INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

METEOROLOGÍA

Técnicas para la predicción de huracanes

NEUROCIENCIA

¿Podemos borrar los recuerdos traumáticos?

FOTÓNICA

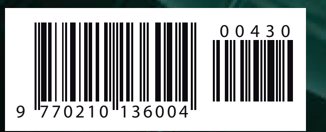
Nanomateriales inspirados en la naturaleza

La unificación de las fuerzas

Una alternativa a los diagramas de Feynman abre una nueva vía para unificar la mecánica cuántica con la relatividad

SELECCIÓN ESPECIAL

ARTÍCULOS ESCRITOS POR PREMIOS NÓBEL EN IyC



6,50 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
LA UNIFICACIÓN DE LAS FUERZAS | PREDICCIÓN DE HURACANES | NANOMATERIALES INSPIRADOS EN LA NATURALEZA
N.º 430
JULIO 2012

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

MENTE y CEREBRO



Suscríbase a la versión DIGITAL
de INVESTIGACION Y CIENCIA y MENTE Y CEREBRO
y acceda al contenido completo de todos los números (en pdf)*

- Durante el período de suscripción, recibirá una notificación por correo electrónico informándole de la disponibilidad de la nueva revista
- Podrá acceder a los ejemplares en cualquier momento y lugar

* Ejemplares de IyC disponibles desde 1996 a la actualidad y el archivo completo de MyC

www.investigacionyciencia.es

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Julio 2012, Número 430

82

ARTÍCULOS

INFORME ESPECIAL
20 La medicina del futuro
Se exponen algunas de las técnicas médicas más prometedoras que se hallan hoy en desarrollo.
VV.AA.

NEUROCIENCIA
26 Borrar los recuerdos dolorosos
Nuevas terapias, conductistas o farmacológicas, podrían atenuar o suprimir la impronta cáustica de una experiencia traumática.
Por Jerry Adler

FÍSICA
32 Nóbeles y noveles
Una selección de textos publicados en Investigación y Ciencia por algunos de los laureados con el Nobel de física. *Por John Matson y Ferris Jabr*
Ilustraciones de John Hendrix

FÍSICA CUÁNTICA
50 Árboles, bucles y nueva física
Puede que la unificación de las interacciones de la naturaleza resulte más sencilla de lo que imaginábamos.
Por Zvi Bern, Lance J. Dixon y David A. Kosower

ROBÓTICA
58 Vehículos autónomos bajo el agua
Los nuevos robots submarinos facilitarán las operaciones de salvamento y la investigación oceánica.
Por Pedro J. Sanz, Pere Ridao y Gabriel Oliver

METEOROLOGÍA
64 Huracán a la vista
La mejora de las técnicas de predicción de tornados y huracanes podría salvar cada año centenares de vidas.
Por Jane Lubchenco y John L. Hayes

ENERGÍA
70 Aprovechamiento energético del mar
Hoy, el agua genera más electricidad que cualquier otra fuente renovable. Pero queda todavía un atractivo depósito por explorar: los océanos. *Por Robert Gast*

ENERGÍA
78 Centrales reversibles de muro circular
Una alternativa flexible y competitiva para almacenar los excedentes energéticos de la producción solar y eólica. *Por Matthias Popp*

FOTÓNICA
82 Trucos cromáticos de la naturaleza
Siete tácticas empleadas por los animales para crear colores deslumbrantes inspiran la invención de técnicas complejas. *Por Philip Ball*




8


44


90

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
Microbios brillantes. Cartografía de la función retiniana. Vida primitiva en el hielo. La conjetura débil de Goldbach. Los verdaderos machos comen yogur. Unos comensales melindrosos. Sopesar los riesgos. Descargas ilegales. El motor de combustión interna.

7 Agenda

10 Panorama
Teoría del conocimiento y patentes de invención. *Por M. M. Altamirano, A. de Hoyos y L. Olivé*
Bacterias como micromáquinas. *Por Á. Goñi Moreno*
Todos a bordo. *Por Kalee Thompson*
Aborígenes, conquistadores y esclavos. *Por Rosa Fregel*
Avances en la domesticación del atún rojo. *Por Fernando de la Gándara*

44 De cerca
Comensalismo. *Por Luis Cardona y Manuel Elices*

46 Filosofía de la ciencia
Metáforas de la vida y vida de las metáforas. *Por Alfredo Marcos*

48 Foro científico
Pobreza energética. *Por Enrique Velo*

88 Curiosidades de la física
Aires de flauta. *Por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik*

90 Juegos matemáticos
Crónica de un éxodo anunciado. *Por Gabriel Uzquiano*

93 Libros
La física como juego. *Por Xavier Roqué*
Renacimiento carolingio. *Por Luis Alonso*
Reflexiones de un OMBE frente al cosmos. *Por Yago Ascasibar*

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA

Los físicos llevan decenios utilizando diagramas de Feynman para estudiar las colisiones entre partículas. Aunque estos proporcionan una imagen muy intuitiva de las interacciones, a menudo desembocan en cálculos de una complejidad extrema. Una nueva técnica permite simplificar cálculos antes considerados irrealizables y, además, parece insinuar una nueva imagen de la gravedad cuántica. Imagen de Kenn Brown, Mondolithic Studios.



Cartas de los lectores

redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero 2012

EPIGENÉTICA Y ANTIBIÓTICOS

En «Interruptores ocultos en la mente» [Investigación y Ciencia, febrero de 2012], Eric J. Nestler analiza los cambios epigenéticos: alteraciones en el comportamiento de los genes que no afectan a la información que contienen. Si convenimos en que las células hijas heredan tales cambios, ¿podrían estos ser responsables, al menos en parte, de que las bacterias desarrollen resistencia a ciertos fármacos? En ese caso, dichos cambios proporcionarían otro método para superar la resistencia a algunos medicamentos. En lugar de buscar un antibiótico nuevo, quizá fuese más sencillo encontrar el modo de deshacer los cambios epigenéticos y restaurar la susceptibilidad bacteriana a los fármacos de los que ya disponemos.

Ted Grinthal
Berkeley Heights, N.J.

Nota de los editores: *Al no ser microbiólogo, el autor remitió la pregunta a Richard Losick, cuyo laboratorio en la Universidad de Harvard investiga las bacterias. Reproducimos la respuesta de Losick:*

Sin duda, la epigenética contribuye a la resistencia a los antibióticos, ya que origina las bacterias denominadas «persistentes». Desde un principio se descubrieron mecanismos epigenéticos en las bacterias, aunque muy diferentes de los basados en histonas que Nestler describe en su artículo (las bacterias carecen de histonas). Las bacterias persistentes son aquellas que sobreviven al tratamiento con antibióticos sin haber experimentado una mutación. En su lugar, entran en un estado reversible en el que son menos vulnerables al exterminio por antibióticos que otras células con idéntica información genética. Sin duda, si pudiéramos idear fármacos que bloqueasen el paso a ese estado de supervivencia contribuiríamos a aumentar la eficacia de las terapias con antibióticos.

AGUJEROS HAMBRIENTOS

En «Agujeros negros de masa intermedia» [Investigación y Ciencia, marzo de 2012], Jenny E. Greene se pregunta por los mecanismos que, en el universo primitivo, permitieron que los agujeros negros supermasivos creciesen tanto y tan deprisa. Si ya en el universo temprano la mayor parte de una galaxia se componía de materia oscura, compuesta por partículas masivas que interactúan débilmente (WIMP), ¿habrían continuado los agujeros negros engullendo materia y aumentando de tamaño, al tiempo que engendraban cantidades considerables de radiación y plasma que alejarían la materia ordinaria?

Peter J. Turchi
Santa Fe, Nuevo México

Responde Greene: *Por diversas razones, no parece muy probable que los agujeros negros supermasivos acreten mucha materia oscura, al menos en relación con la materia normal que consumen y con la cantidad de materia oscura existente en el universo. Por tanto, la respuesta más plausible es «no».*

ABIERTA Y COMPETITIVA

La información referente al proyecto guifi.net aparecida en el artículo de J. Dibbell «La red en la sombra» [Investigación y Ciencia, mayo de 2012] merece ser ampliada, tanto por las dimensiones actuales de la red (17.000 nodos activos y 30.000 kilómetros de enlaces) como por su ritmo de crecimiento y actividad.

Gracias al formato abierto y a unos medios técnicos al alcance de todos, guifi.net ha creado un ecosistema sostenible basado en el autoservicio, donde los nuevos participantes extienden la red con los equipos que aportan cuando pasan a formar parte de ella. El mantenimiento de la titularidad de dichos equipos conforma un sistema de propiedad distribuida que blinda la red contra posibles privatizaciones. El único acuerdo suscrito por los participantes es el de interconexión XOLN (guifi.net/es/ProcomunXOLN). Este garantiza que, en el futuro, el formato de la red permanecerá inalterado, que esta continuará abierta a cualquier participante y que el tráfico no podrá alterarse.

El volumen de actividades es tal que ya han aparecido oportunidades de negocio, como instalaciones de nodos, servicios de mantenimiento o acceso a Internet, entre otros. Si bien tradicionalmente los enlaces se han creado mediante el sistema WiFi, el empleo de fibra óptica es cada vez más frecuente. La capacidad de reactivación del sector de las telecomunicaciones —especialmente en el campo de la fibra óptica— que ha demostrado este nuevo tipo de red ha merecido la atención de la Comisión Europea.

A través de su fundación, guifi.net participa en varios proyectos europeos de investigación sobre redes comunitarias (confine-project.eu y commonsforeurope.net/theproject). En este contexto, el próximo octubre se celebrará en Barcelona la Reunión Internacional de Redes Inalámbricas Comunitarias (www.wirelesssummit.org), donde se darán cita numerosas comunidades de redes abiertas de todo el mundo. Creemos que se tratará de una oportunidad única para conocer todo tipo de iniciativas y experiencias de construcción de redes ciudadanas de telecomunicaciones, por lo que invitamos a participar a todos los interesados.

Roger Baig Viñas
Fundación guifi.net



Mayo 2012

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

MEDICINA

Visión esperanzada

Después de varios años de contratiempos, la terapia génica vuelve a cosechar resultados prometedores. Un área en la que está demostrando su gran potencial es la restauración de la visión en pacientes que han estado perdiéndola desde que nacieron.

Entre los años 2008 y 2011, Jean Bennett, neuróloga de la Universidad de Pensilvania, y sus colaboradores utilizaron la terapia génica para tratar la ceguera en doce adultos y niños con amaurosis congénita de Leber (ACL). Se trata de una enfermedad ocular muy infrecuente que destruye la visión al dañar los fotorreceptores, las células de la retina sensibles a la luz. Los niños afectados suelen presentar problemas de visión desde el nacimiento, que se van agudizando a medida que van perdiendo más y más fotorreceptores.

El tratamiento se basó en el hecho de que las personas con esta enfermedad terminan por quedar ciegas debido a mutaciones genéticas en las células de la retina. Una de estas mutaciones impide la producción de una enzima que transforma el retinol (una forma de vitamina A) en una sustancia que necesitan los fotorreceptores para detectar la luz y enviar señales al cerebro.

En su estudio inicial, Bennett y sus colaboradores trataron uno de los ojos de los doce participantes. Seis de ellos mejoraron tanto que dejaron de cumplir los criterios legales de ceguera. En un trabajo posterior, publicado en *Science Translational Medicine*, tres de las mujeres del grupo recibieron una inyección de genes funcionales en el ojo que no había sido tratado en el estudio anterior y se les realizó un seguimiento durante seis meses. Su visión en ese ojo mejoró en solo dos semanas desde la operación: podían evitar obstáculos con luz tenue, leer textos escritos en letra grande y reconocer rostros.

Bennett demostró no solo que los ojos de esas pacientes se habían vuelto más sensibles a la luz, sino que sus cerebros también respondían mejor a los estímulos ópticos. Las imágenes de resonancia magnética funcional revelaron actividad en regiones de la corteza visual que no la presentaban antes del tratamiento. De modo sorprendente, la segunda fase de la terapia génica también reforzó la respuesta del cerebro al ojo tratado al principio, además de la del otro ojo, quizá porque los dos ojos actúan de forma combinada y algunos aspectos de la visión se basan en la binocularidad.

Bennett cree que el tratamiento funcionará aún mejor en pacientes más jóvenes, que no han perdido tantos fotorreceptores. Los resultados permiten confiar en la restauración futura de una visión suficiente en personas con ACL y otras formas de ceguera hereditaria. *—Ferris Jabr*

ECOLOGÍA

Microbios brillantes

Las bahías bioluminiscentes se hallan entre los ecosistemas más raros y frágiles que existen. Se forman cuando enormes cantidades de microorganismos, a menudo dinoflagelados marinos como *Pyrodinium bahamense*, se congregan en una laguna con una abertura al mar lo suficientemente estrecha como para impedir que estos organismos se escapen. Los dinoflagelados, integrantes del fitoplancton, se alimentan de la vitamina B12 producida por los mangles rojos y brillan con una luz verdeazulada cuando son perturbados por cualquier movimiento. Debido a que las bahías bioluminiscentes necesitan condiciones muy específicas para sobrevivir, solo se conocen un puñado de ellas en todo el mundo, la mayoría en el Caribe.

Ahora hay una más: en 2010, los ecólogos identificaron una bahía bioluminiscente en la Reserva Natural de Humacao, en Puerto Rico. Se formó después de que el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos construyese canales para proteger los pueblos de la zona contra las inundaciones. Los canales permitieron que el agua marina del Caribe fluyese hacia las antiguas lagunas de aguas salobres de Humacao. «Con la marea, llegó un dinoflagelado bioluminiscente», afirma Ricardo Colón-Rivera, de la Universidad A&M de Texas.

Para su sorpresa, Colón-Rivera y sus colaboradores han descubierto que el dinoflagelado responsable del espectáculo luminoso no es *P. bahamense*, sino otro que aún no han identificado. También esperan llegar a comprender los efectos de la salinidad, las precipitaciones lluviosas y el cambio climático sobre la bioluminiscencia, con el propósito de facilitar la conservación de estas bahías.

La bahía bioluminiscente de Humacao se formó por la confluencia de una serie de sucesos muy poco frecuentes, afirma Rusty Feagin, también de la Universidad A&M de Texas. «Tenemos que entenderla y protegerla, antes de que su luz se apague.» *—Cheryl Lyn Dybas*

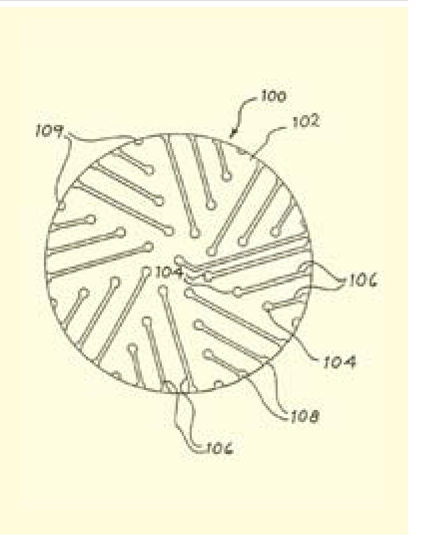
GETTY IMAGES

PATENTES

Cartografía de la función retiniana: Dos millones de personas padecen glaucoma en Estados Unidos. Esta enfermedad, una de las principales causas de ceguera, se produce como consecuencia de daños en las células ganglionares de la retina. En su primera etapa, el glaucoma es tratable, y cuanto antes se detecta más fácil es la recuperación. Pero identificar el glaucoma resulta complicado, porque suele aparecer en los bordes de la retina, más allá de nuestro campo habitual de visión. La forma estándar de detectarlo tiene varias décadas de antigüedad. Se basa en colocar en el ojo una lente de contacto con un electrodo integrado en la misma. Se muestra al paciente una serie de destellos de luz y el electrodo capta las respuestas eléctricas de la retina. Pero esa señal no capta las diferencias espaciales en la salud de la retina, afirma John Hetling, de la Universidad de Illinois.

A los médicos les cuesta determinar si una parte de la retina se halla en buen estado y la otra no. El equipo de Hetling se ha propuesto mejorar el método estándar. Están desarrollando una lente que lleva integrados muchos más electrodos, entre 33 y 57. Esos electrodos adicionales permiten realizar el diagnóstico de una zona más amplia de la retina en un tiempo notablemente inferior. Su dispositivo, con número de patente 8.118.752, también podría ayudar a detectar otras retinopatías provocadas por la diabetes, la hipertensión, la anemia falciforme o un nacimiento prematuro.

—Rose Eveleth



MICROBIOLOGÍA

Vida primitiva en el hielo

Apresados en el hielo de la Antártida y Groenlandia, un mundo olvidado de seres de otra era espera una nueva oportunidad para salir a la luz. Antiguamente se pensaba que las placas de hielo polar constituían un entorno demasiado duro e inhóspito para albergar vida. Ahora, sin embargo, se sabe que representan una enorme reserva de microorganismos, atrapados antes de que los humanos apareciesen en el planeta.

Debido a la velocidad alarmante del deshielo en esas zonas, pronto podríamos encontrarnos con grandes cantidades de bacterias y otros microbios nunca vistos desde mediados del Pleistoceno, la última época en la que se produjo un gran cambio climático, hace unos 750.000 años.

John Priscu, experto en ecología microbiana de la Universidad estatal de Montana, ha pasado los últimos 28 inviernos en la Antártida, estudiando los microorganismos de las placas de hielo. Ha encontrado bacterias vivas, con capacidad de crecer y dividirse, en testigos de hielo de 420.000 años de antigüedad.

¿Suponen una amenaza para la salud humana? Probablemente no, porque la mayoría de las bacterias identificadas hasta el momento están emparentadas con las bacterias comunes del suelo y de los océanos. Sin embargo, teniendo en cuenta que los gases de efecto invernadero están calentando las regiones polares mucho más deprisa que el resto del planeta, se plantean otras preguntas acerca de esos seres vivos.

Se está intentando averiguar el modo en que esos microorganismos permanecen en un estado de animación suspendida durante milenios. Los resultados podrían abrir el camino hacia el descubrimiento de vida en otros climas extremos, como lunas o planetas congelados.

Pero de momento el motivo de preocupación más inmediata reside en la Tierra. Las células y el carbono que liberen los glaciares al derretirse podrían convertirse en enormes cantidades de materia orgánica que generarían dióxido de carbono y metano al descomponerse. Ello constituiría una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero, un aspecto que los climatólogos aún no han tenido en cuenta. Además, se han descubierto indicios de que los microorganismos están evolucionando en el interior de las placas de hielo. Están intercambiando ADN y obteniendo nuevos rasgos que les permitirían conquistar nuevos nichos ecológicos.

Aunque no parece que estos organismos del hielo vayan a suponer una amenaza para los animales de sangre caliente, podrían acabar con algunas poblaciones de microorganismos actuales, lo que tendría consecuencias impredecibles.

—Cheryl Katz



Conservación en frío: Un glaciar en la Antártida, visto desde un satélite.

CREADO POR JESSE ALLEN, A PARTIR DE DATOS DE NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS Y EQUIPO CIENTÍFICO ASTER DE EE.UU./JAPÓN (*glaciar*); CORTESÍA DE LA OFICINA DE PATENTES Y MARCAS DE EE.UU.

MATEMÁTICAS

La conjetura débil de Goldbach se acerca a una solución

Uno de los problemas matemáticos más antiguos aún sin resolver es la conjetura débil de Goldbach. Esta afirma que cualquier número impar mayor que 5 puede expresarse como la suma de tres números primos. Por ejemplo:

$$35 = 19 + 13 + 3$$

o

$$77 = 53 + 13 + 11$$

Terence Tao, de la Universidad de California en Los Ángeles, ha conseguido acercarse a una solución: ha demostrado que es posible escribir cualquier número impar como suma de cinco primos, por lo que alberga esperanzas de poder reducirla a tres. Tao explica que, aparte de la satisfacción de descifrar un enigma que lleva desconcertando a los mejores matemáticos desde hace casi tres siglos, la demostración podría tener también aplicaciones para la encriptación de datos.

En el siglo XVIII, el matemático alemán Christian Goldbach enunció la conjetura «débil» que hoy lleva su nombre. Esta es pariente cercana de la versión «fuerte», bautizada así también en honor a Goldbach pero formulada en realidad por Leonhard Euler: que cada número par mayor que 2 puede escribirse como la suma de dos números primos. Como indica su nombre, la versión débil quedaría automáticamente demostrada en caso de establecerse la validez de la fuerte: en tal caso, para escribir un número impar como suma de tres números primos, bastaría con restar 3 y aplicar la versión fuerte al número par resultante.

La validez de ambas afirmaciones ha sido verificada por medios informáticos para todos los números de hasta 19 dígitos. Por el momento, no se conocen excepciones. Además, cuanto mayor es el número considerado, más posibilidades hay para expresarlo como la suma de dos o tres números. Por tanto, la probabilidad de que ambas conjeturas sean ciertas aumenta a medida que consideramos números mayores. De hecho, los matemáticos han demostrado que, si existieran excepciones a la conjetura fuerte, deberían aparecer con una frecuencia cada vez menor a medida que consideramos números más y más grandes. En cuanto a la versión débil, un teorema clásico de los años treinta del siglo pasado afirma que, en caso de haberlas, el número de excepciones a la conjetura habría de ser finito: en otras palabras, que la conjetura débil de Goldbach es siempre cierta para números «lo suficientemente grandes». Tao combinó los resultados informáticos válidos para números pequeños con los aplicables a números grandes. Al mejorar los cálculos anteriores con un gran número de pequeñas modificaciones, explica, demostró que podía llegar a solapar ambos intervalos de validez si se le permitía emplear cinco números primos.

Tao espera generalizar su método y demostrar que tres números primos bastan en todos los casos. Esto, sin embargo, probablemente no ayude a demostrar la conjetura fuerte. Sin duda, la demostración de la conjetura débil resultará más sencilla, reconoce Tao, ya que al descomponer un número en la suma de otros tres existen muchas más probabilidades de conseguir que todos sean primos. Dos siglos y medio después de la muerte de Goldbach, nadie ha logrado aún esbozar una estrategia para afrontar este gran desafío. *—Davide Castelvecchi*

NUTRICIÓN

Los verdaderos machos comen yogur

El verano pasado, un equipo del Instituto Tecnológico de Massachusetts se propuso ahondar en los efectos del yogur sobre la obesidad. Seguían los pasos de un estudio a largo plazo de la Escuela de Salud Pública de Harvard, que había sugerido que el yogur, más que ningún otro alimento, ayudaba a evitar el aumento de peso relacionado con la edad. Los investigadores, dirigidos por Susan Erdman, especialista en biología del cáncer, y Eric Alm, experto en genética evolutiva, querían reproducir este trabajo en ratones. Para ello alimentaron a un grupo de 40 machos y 40 hembras bien con una dieta alta en grasas y baja en fibras y nutrientes, que imitaba la comida basura, o bien con la alimentación estándar de los ratones. Después, complementaron la dieta de la mitad de los ratones de cada grupo con yogur con sabor a vainilla.

Su objetivo era entender cómo afectaban los alimentos probióticos a los niveles de obesidad y a los trastornos relacionados, incluido el cáncer. Sin embargo, Erdman afirma que los aspectos más interesantes del estudio fueron precisamente hallazgos que no habían previsto.

En primer lugar, descubrieron que los ratones que ingerían yogur presentaban un sorprendente aspecto lustroso. Mediante técnicas tradicionales de histología y escalas de medida usadas en cosmética, mostraron que estos animales tenían una densidad de folículos activos diez veces superior a la de otros ratones, lo cual les proporcionaba un pelaje sedoso exuberante.

Los investigadores se fijaron luego en algo curioso en relación con los machos: proyectaban sus testículos hacia fuera, lo cual hacía que anduviesen con un cierto aire «fanfarrón ratonil», señala Erdman. Al medir a los machos, encontraron que los testículos de los consumidores de yogur eran en torno a un cinco por ciento más pesados que los de los individuos alimentados solo con la dieta habitual, y sobre un quince por ciento más pesados que los de los múridos alimentados con comida basura.

Y lo más importante: esa masculinidad recompensaba. En experimentos de apareamiento, los machos alimentados con yogur inseminaron más rápidamente a las hembras y produjeron más crías que los ratones de control. Por otra parte, las hembras que tomaban las dietas con yogur dieron a luz a camadas más numerosas y destetaron a sus crías con mayor éxito. Según sus resultados, no publicados todavía, Erdman y Alm creen que los microorganismos probióticos del yogur ayudan a hacer que los animales sean más esbeltos y saludables, lo cual, a su vez, mejora de forma indirecta la virilidad sexual.

Estos resultados podrían tener consecuencias para la fertilidad humana. En un trabajo aún en curso, un equipo dirigido por Jorge Chavarro, epidemiólogo nutricionista de Harvard, ha investigado la relación entre la ingesta de yogur y la calidad del semen en los hombres. Hasta la fecha, sus resultados preliminares concuerdan con lo hallado en los ratones. *—Elie Dolgin*

BOTÁNICA

Unos comensales melindrosos

En la novela *El ladrón de orquídeas*, la escritora Susan Orlean describe la devoción casi religiosa que estas flores de apariencia exótica inspiran en los coleccionistas. Una razón por la que las orquídeas son tan apreciadas, además de su belleza, es su fragilidad. Aunque crecen en todas las zonas de Estados Unidos y en todos los continentes excepto la Antártida, muchas se hallan en peligro de extinción y sus flores son muy sensibles a los cambios ambientales. Algunas semillas de orquídeas, con apariencia de polvo, germinan solo en la proximidad de ciertos grupos de hongos de las raíces, las micorrizas.

Se sabe poco sobre estos organismos. Tan poco, que muchos de ellos aún no tienen nombre. Crecen en las raíces de las orquídeas, las cuales se sirven de los hongos para obtener los nutrientes que necesitan. Un estudio reciente, de cuatro años de duración, ha arrojado nueva luz sobre los lugares en los que crecen las micorrizas y sobre las condiciones en las que hacen germinar a las orquídeas. Los resultados, publicados en el número online del 24 de enero de *Molecular Ecology*, ayudarán a los ecólogos a conservar las variedades más raras de orquídeas.

El equipo dirigido por Melissa McCormick, ecóloga del Centro Smithsoniano de Investigación Ambiental de Edgewater, Maryland, plantó y realizó un seguimiento de tres especies de orquídeas estadounidenses, todas ellas presentes al este del país y en peligro de extinción en algunas zonas. El estudio se llevó a cabo en seis lugares: en tres bosques de entre 50 y 70 años de edad, y en tres bosques más viejos, de entre 120 y 150 años. Se seleccionaron parcelas experimentales que se cubrieron con restos de hojarasca, con madera en descomposición o bien se dejaron sin cubrir. En la mitad de las parcelas, se introdujo a continuación el hongo específico que promueve el crecimiento de cada orquídea.

Los investigadores también identificaron los hongos existentes en cada bosque. Debido a que estos organismos carecen de estructuras de fructificación, puede resultar difícil identificarlos; así que optaron por técnicas muy avanzadas, basadas en el análisis del ADN del suelo, para localizar los hongos y determinar su cantidad. Hallaron que los bosques más antiguos presentaban entre cinco y doce veces más micorrizas de orquídeas que los bosques más jóvenes, y que los hongos de los bosques más antiguos mostraban una mayor diversidad.

Cada orquídea presentaba unos requisitos de crecimiento diferentes. En el caso de *Goodyera pubescens* (en la foto, su tallo florífero), solo los bosques más antiguos albergaban suficiente cantidad de hongo para permitir la floración. El mero hecho de añadir el hongo al suelo en los bosques más jóvenes, solo o con madera en descomposición, no hizo germinar las semillas de *Goodyera*. La micorriza que favorece el crecimiento de *Tipularia discolor*, orquídea con numerosas flores pequeñas, de color violáceo y amarillentas en el centro, era abundante en los bosques más antiguos y en los jóvenes, pero solo permitía la germinación cuando había madera en descomposición. El hongo asociado a *Liparis liliifolia* no era frecuente en los bosques, pero la orquídea germinaba si se añadía el hongo al terreno.

Los planes para la conservación de las orquídeas no suelen tener en cuenta los requisitos relativos a la presencia o abundancia de los hongos de estas plantas, simplemente debido a la ausencia de técnicas y conocimientos necesarios para identificarlos. McCormick confía en que se sigan investigando este tipo de técnicas para determinar mejor las condiciones ambientales que afectan a los hongos.

—Carrie Madren

LARRY WEST, MINDEN PICTURES (*Goodyera pubescens*); INSTITUTO PIRENAICO DE ECOLOGÍA/M. MAZA (*Saxifraga moncayensis*)

AGENDA

CONFERENCIAS

11 de julio
Sobre manos y pies en Atapuerca: caminando y manipulando durante millones de años
Carlos Lorenzo,
Universidad Rovira i Virgili
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

EXPOSICIONES

QWERTY: Evolución de una especie tecnológica
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
La Coruña
www.muncyt.es

OTROS

Del 9 al 12 de julio - Congreso
Cuestiones globales en biología avanzada
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
scb-congres.espais.iec.cat

12 de julio - Jornada
Enseñanza y divulgación de la química y la física
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales UPM
Madrid
quim.iqi.etsii.upm.es/didacticaquimica/inicio.htm

Del 14 al 18 de julio - Congreso
8.º Foro de Neurociencia FENS
Centro de Convenciones Internacional
Barcelona
fens2012.neurosciences.asso.fr

Del 16 al 20 de julio - Curso
Flora y vegetación del Pirineo
Instituto Pirenaico de Ecología - CSIC
Jaca
www.ipe.csic.es



Del 25 al 27 de julio - Curso
En memoria de Alan Turing (1912-1954): el fundador de la informática, cien años después
Universidad Complutense de Madrid
San Lorenzo de El Escorial
www.ucm.es/info/cv



MEDICINA

Sopesar los riesgos

Una de las elecciones más importantes que debe realizar una mujer embarazada consiste en cómo enfrentarse al dolor del parto. Más del sesenta por ciento de las estadounidenses eligen aliviarlo mediante una inyección epidural, una combinación de anestésico local y narcóticos que se administran en el espacio (epidural) que rodea la médula espinal. Aunque la mayoría de los médicos opinan que las inyecciones son seguras, una nueva investigación sugiere que podrían aumentar el riesgo de que la madre sufriera fiebres durante el parto, lo que supondría un riesgo para el niño.

La epidural siempre ha resultado polémica. Algunos trabajos habían sugerido que las mujeres que la solicitaban eran más propensas a requerir una cesárea de urgencia. Pero un estudio de 2011 señaló que la epidural no aumenta el riesgo de cesárea respecto de otros métodos de alivio del dolor. Ese mismo análisis, sin embargo, encontró que la epidural aumenta la probabilidad de que los médicos deban recurrir al uso de fórceps o ventosa.

Ahora, las madres cuentan con nuevos datos para tomar su decisión. En un nuevo trabajo publicado en febrero en la revista *Pediatrics*, un grupo de la facultad de salud pública de Harvard y de la facultad de medicina del mismo centro monitorizó la evolución de 3209 mujeres con embarazo de bajo riesgo, que iban a dar a luz a su primer hijo. De entre las que recibieron anestesia epidural, casi una de cada cinco sufrió fiebre de al menos 38 ºC durante el parto, en comparación con solo un 2,4 por ciento de las que recibieron otros medicamentos o que no utilizaron analgésicos. Cuanto más alta era la fiebre de la madre, mayor era la probabilidad de que el recién nacido presentase una baja puntuación Apgar (un indicador de la salud general del recién nacido), así como un bajo tono muscular y dificultades respiratorias. El 8,6 por ciento de las mujeres que recibieron la epidural y que sufrieron una fiebre de más de 38,5 ºC tenían una probabilidad seis veces mayor que la de las madres sin fiebre de que su bebé sufriera convulsiones al poco de nacer. Aun así, el riesgo total de sufrir convulsiones era muy bajo: solo un 1,3 por ciento. En opinión de Ellice Lieberman, coautora del estudio, el cóctel de medicamentos de la epidural podría estar suscitando una respuesta inflamatoria.

La gran cuestión que queda por responder es si esas fiebres podrían tener efectos más duraderos sobre la salud. «No lo sabemos», reconoce Lieberman, aunque apunta que la mayoría de los efectos parecen ser transitorios. En cualquier caso, debido a que la fiebre tarda una media de seis horas en desarrollarse después de administrarse la epidural, las mujeres que quieran minimizar los riesgos podrían considerar la posibilidad de solicitar anestesia solo cuando parezca claro que el bebé ya está en camino.

—Melinda Wenner Moyer

¿QUÉ ES ESTO?

Nueva especie: Esta criatura enrollada sobre sí misma pertenece a una de las siete nuevas especies de anfibios sin extremidades descubiertas hace poco en el subsuelo de la zona nororiental de la India. Tras cavar durante más de mil horas, los investigadores hallaron las siete especies en un total de 58 localizaciones.

No se trata de las primeras especies descubiertas por Sathyabhama Das Biju, de la Universidad de Deli, y su equipo: los investigadores han descrito ya 48 especies nuevas. A Biju le preocupa que muchas se encuentren en peligro debido al constante desarrollo de la zona norte del país. *—Rose Eveleth*



BLAINE HARRINGTON III, CORBIS *(bebés)*; CORTESÍA DE SATHYABHAMA DAS BIJU, UNIVERSIDAD DE DELI *(anfibio)*

PIRATERÍA

Descargas ilegales e ingresos cinematográficos



La naturaleza turbia de las descargas ilegales hace que resulte muy difícil analizar la relación entre la piratería y la caída de ingresos de una productora. ¿Se corresponde cada descarga de una película con una entrada de cine no vendida, o recurren a la piratería justamente aquellos que jamás habrían pagado por entrar al cine?

Brett Danaher, economista de la Universidad de Wellesley, y Joel Waldfogel, de la Universidad de Minnesota, han intentado desentrañar la relación entre ambos fenómenos. Los estudios de Hollywood suelen esperar varias semanas desde que estrenan una película en EE.UU. hasta que la proyectan en el extranjero. Durante ese tiempo, los aficionados en otros países pueden encontrarla en sitios de intercambio de archivos basados en el protocolo BitTorrent, pero no en los cines de su localidad. Si la piratería en Internet redujese la venta de entradas, el retraso en los estrenos internacionales repercutiría en una caída de taquilla en esos países.

Los investigadores crearon una base de datos en la que incluyeron los ingresos de taquilla de las diez películas más populares en diecisiete países durante tres años. Después, consideraron las películas estrenadas antes y después de la popularización de BitTorrent. Tras tener en cuenta todos los factores que pudieran afectar a la recaudación, los economistas observaron que las películas que salieron a la cartelera después de que el uso de BitTorrent se generalizase sufrieron una merma de ingresos con respecto a las que se estrenaron antes. De hecho, las pérdidas se mostraron tanto mayores cuanto más tiempo hubiese transcurrido entre su estreno en EE.UU. y su primer pase público en otros países.

Además, los géneros más populares para la piratería digital se revelaron como los que más pérdidas sufrían. «Después de BitTorrent, las consecuencias de un retraso en el estreno de una película de acción o ciencia ficción resultan mucho mayores que en los demás géneros», sostiene Danaher. El economista cifra en unos 240 millones de dólares las pérdidas anuales de la recaudación en taquilla de fin de semana en los diecisiete países estudiados.

El estudio apoya también uno de los controvertidos argumentos que suelen emplear los defensores de la piratería: que la gente acude a las descargas ilegales cuando esa es la única forma que les permite acceder a un contendido. Danaher menciona otro episodio de 2007, cuando, como consecuencia de una disputa con Apple, la cadena NBC retiró de la noche a la mañana sus contenidos de la tienda de iTunes. Poco después, el tráfico de contenidos de NBC pirateados aumentó de manera drástica. Puede que las nuevas leyes contribuyan a alejar a algunos usuarios de las descargas ilegales, pero las compañías deben proporcionarles lugares alternativos para encontrar lo que buscan.

—Michael Moyer

HISTORIA DE LA TÉCNICA

El motor de combustión interna

Hoy en día casi todos los vehículos están movidos por una u otra versión del motor de combustión interna de cuatro tiempos patentado en 1876 (*imagen*) por Nikolaus Otto. Aprovechó este los descubrimientos de Sadi Carnot, quien en 1824 demostró que el rendimiento de un motor depende críticamente de la diferencias de temperatura entre una «fuente» de energía, o foco caliente, y un «sumidero», o foco frío. El motor de cuatro tiempos comprime una mezcla de aire y combustible (aire carburado) y la enciende mediante una chispa, creando así una fugaz pero intensa fuente de calor, cuyo rendimiento aún no ha sido igualado.



Hay quienes creen que este ingenio es un anacronismo, un vestigio peligrosamente anticuado de un mundo que suponía que el petróleo era inagotable y el clima estable. La mejor esperanza para desplazar el motor de combustión interna es el motor eléctrico alimentado por un acumulador de energía como son las baterías químicas o las células de combustible alimentadas por hidrógeno. Lo que muchos olvidan es que los vehículos eléctricos ya tuvieron su ocasión; de hecho, a finales del siglo XIX y comienzos del XX eran mucho más populares que los de gasolina. Eran capaces de funcionar todo el día con una sola carga y transportar un conductor por toda la ciudad. No necesitaban manivela de arranque y no tenían cambio de marchas, características estas que hacían que los vehículos de gasolina de la época fueran tan agradables de usar como una retroexcavadora.

Los vehículos eléctricos, empero, eran más adecuados al mundo del siglo XIX que al del siglo XX. Funcionaban todo el día con una carga porque el límite de velocidad estaba fijado entre 12 y 20 kilómetros por hora para adaptarse a los carruajes de tracción animal. Cuando, tras la I Guerra mundial, aumentaron los límites de velocidad y se hicieron habituales los desplazamientos entre poblaciones, los vehículos de gasolina empezaron a dominar el mercado.

Desde entonces, los fabricantes han invertido incontables millardos para aumentar el rendimiento de los motores de cuatro tiempos. Hasta que los coches eléctricos sobrepasen en potencia y autonomía a los de gasolina, el motor de combustión interna prolongará su ya largo reinado.

—Michael Moyer



THOMAS FUCHS (*símbolo piratería*); SHEILA TERRY, PHOTO RESEARCHERS, INC. (*motor*)

EPISTEMOLOGÍA

Teoría del conocimiento y patentes de invención: ¿dos mundos distintos?

Gran parte del conocimiento implícito en el desarrollo de una innovación se transmite de forma explícita en el documento de patente

Las patentes han ganado importancia en la evaluación de la ciencia y la tecnología, tanto en las universidades como en los centros de investigación. Además de proteger los derechos de propiedad intelectual y la explotación de sus beneficios, las patentes constituyen uno de los mecanismos más efectivos para el desarrollo y la comunicación del conocimiento. El conocimiento científico y técnico ha aumentado de forma exponencial en las últimas décadas, al igual que las patentes que protegen la propiedad intelectual de las invenciones asociadas a este tipo de conocimiento (sobre todo en los campos relacionados con las ciencias de la vida y la salud).

En este artículo presentamos una investigación epistemológica de las patentes biotecnológicas. Mediante el análisis de los documentos de patente, nos proponemos explorar la posibilidad de transformar el conocimiento antes tácito (previamente implícito en el proceso de innovación) en conocimiento explícito, que puede transmitirse por medio de un lenguaje proposicional. Para ello debemos tener en cuenta que el actual sistema de patentes adolece de ciertos fallos, como la ausencia de referencia explícita al conocimiento tradicional o local que contribuyó a un invento. El análisis epistemológico aquí propuesto quizás ayude a clarificar tales casos mediante el rastreo de las trayectorias epistémicas, que permiten identificar las fuentes del conocimiento implicado.



El proceso de innovación consta de varias etapas en las que se conectan dinámicamente las condiciones en las cuales se origina el problema, así como los resultados y el impacto de la invención (por ejemplo, las patentes y el conocimiento relacionado). *Conocimiento tácito*: conocimiento práctico que permite llevar a cabo acciones hacia un fin dado. Además de guiar los métodos y las habilidades en las áreas científicas, también permite un uso correcto de los instrumentos y la estructuración de las experiencias obtenidas. *Máximas*: reglas o principios de un arte. Delinean una práctica, pero para poder guiarla, requieren conocimiento tácito y experiencia. *Trayectoria epistémica*: composición y conexiones entre las ideas, conceptos, argumentos, habilidades, métodos y prácticas que un científico (o grupo) posee y sigue, y que le permiten llevar a cabo su labor de investigación. *Red epistémica*: interacciones entre las diversas trayectorias epistémicas y sus relaciones con la comunidad científica, los instrumentos, los recursos y la configuración institucional.

Epistemología de la innovación

La reglamentación impuesta por las autoridades que regulan la propiedad intelectual se halla resumida en el manual de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual y la Ley de la Unión Europea para las patentes biotecnológicas. Esta reglamentación hace énfasis en la necesidad de explicar el conocimiento tácito que se deriva de los documentos de patente. El análisis epistemológico ofrece una oportunidad para crear una nueva área de investigación que permita mejorar la transmisión de este conocimiento. Brindar acceso al mismo conlleva varios beneficios: promueve una mayor accesibilidad a la información científica, llena los vacíos existentes en la comunicación entre los miembros de la comunidad científica mundial y hace que la información se halle disponible para el resto de la sociedad, lo cual puede desencadenar futuras innovaciones.

Desde un punto de vista epistemológico, ¿cómo podemos entender la invención en el campo de la biotecnología? Las ideas generadas por el inventor constituyen representaciones de medios y artefactos que permiten la solución de un problema técnico. En el campo de la biotecnología, la solución de un problema usa o produce material biológico. El proceso creativo que contribuye a la invención comienza cuando se identifica un problema; a ello le siguen repetidas pruebas experimentales y adaptaciones que forman parte del proceso de innovación. Estos medios sin precedentes (ideas, argumentos, métodos, artefactos, etcétera), que resuelven el problema por primera vez o de manera más eficiente que los anteriores, hacen que se cumpla con los requisitos de novedad estableci-

dos por las leyes internacionales de patentes.

Muchos de los elementos que constituyen y permiten el desarrollo de la ciencia y la tecnología corresponden a habilidades aprendidas en los ámbitos cognitivo, técnico y social. Estas permiten el reconocimiento de los elementos relevantes para la investigación científica y se ciñen a reglas que están siendo seguidas, pero que no necesariamente resultan evidentes para la persona que las sigue. Las habilidades prácticas, por tanto, implican conocimiento tácito que también ejerce una gran influencia en el progreso de las investigaciones. Los elementos explícitos y tácitos del conocimiento en los trabajos científicos permiten a los investigadores trazar nuevas trayectorias epistémicas que conectan ideas, conceptos y argumentos, así como métodos y prácticas, que en conjunto favorecen la invención. Estas trayectorias epistémicas interactúan entre sí y con los miembros de una comunidad científica (agentes epistémicos) para crear una red epistémica. En estas redes epistémicas podemos trazar las máximas, que describen la trayectoria del conocimiento tácito; asimismo, funcionan como puntos de referencia que guían a otros investigadores del campo científico en particular, dado que les permiten verificar y reproducir los métodos y resultados previamente existentes.

Cada etapa inventiva surge de un trasfondo único establecido por una red epistémica inédita, la cual incluye el conocimiento tácito adquirido a lo largo de experiencias previas y de las interacciones dentro de una comunidad epistémica en varias instituciones de investigación científica. Estos elementos epistémicos se integran y relacionan de una forma tal que genera un *momentum* mediante el cual el investigador resuelve el rompecabezas, al tiempo que facilita la creación de nuevas máximas y, por ende, nuevas trayectorias epistémicas. El documento de patente requiere elucidar la etapa inventiva implicada en el proceso o artefacto patentado. En esta clarificación, las máximas de las prácticas científicas y tecnológicas se hacen explícitas.

Conclusiones

El cumplimiento de los requisitos para registrar una patente estimula a los científicos a esclarecer gran parte del conocimiento tácito implicado en el proceso innovador que ha conducido a su invención, y a describirlo con gran detalle en el documento de patente. Este resultado epistemológico respalda la importancia de estos documentos como un vector de transmisión del conocimiento porque establecen las pautas que trazan las nuevas trayectorias epistémicas, que incluyen una gran cantidad de conocimiento tácito.

Entender las implicaciones del uso del conocimiento tácito puede producir un proceso cooperativo (efecto dominó) que transforme las investigaciones epistemológicas de la innovación en un amplio espectro de información científica a nivel mundial. La comunidad científica debería ser consciente del potencial que ello representa para la transferencia del conocimiento tácito, que promueve una mayor accesibilidad a la información científica y fortalece el desarrollo académico de las nuevas generaciones de científicos.

—Myriam M. Altamirano Bustamante
Unidad de Investigación de Enfermedades Metabólicas
Grupo Transfuncional en Ética Clínica
Centro Médico Nacional Siglo XXI
México D.F.

—Adalberto de Hoyos
Facultad de Estudios Superiores Acatlán
UNAM, Naucalpán de Juárez

—León Olivé
Instituto de Investigaciones Filosóficas
UNAM, México D.F.

Artículo original publicado en *Nature Biotechnology*, vol. 29, págs. 977-978, 2011. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2011

BIOLOGÍA SINTÉTICA

Bacterias como micromáquinas

El control sobre la expresión génica y los mecanismos de comunicación celular permite implementar funciones lógicas en poblaciones de bacterias

La biología ha guiado el diseño de computadoras y el desarrollo de algoritmos matemáticos desde mediados del siglo xx. Con el cambio de milenio, sin embargo, ese flujo de inspiración se invirtió y comenzaron a diseñarse microorganismos con el objetivo de que desempeñasen tareas básicas de cálculo lógico. Se impulsaba así la investigación en biología sintética, un campo interdisciplinar que, asistido por la ingeniería, persigue la creación de máquinas biológicas dotadas de funciones no naturales. Sus aplicaciones potenciales abarcan áreas tan dispares como la medicina o la ecología.

El diseño de biocircuitos parte de la manipulación de las rutas metabólicas de la célula; en particular, la de aquellas relacionadas con los procesos de expresión génica. La síntesis de una proteína comienza cuando la enzima polimerasa se une al promotor del gen encargado de codificar dicha proteína. Un promotor es una secuencia de ADN situada delante del gen y cuya función consiste en señalar el inicio del proceso de transcripción. La enzima recorre entonces el segmento de ADN desde el promotor hasta una secuencia de terminación. En el proceso, genera una cadena de ARN que, más tarde, la célula empleará para sintetizar la proteína. La acción de los promotores queda regulada por medio de factores de transcripción, proteínas que activan o inhiben el proceso de expresión génica. En particular, gracias al empleo de promotores y factores de transcripción específicos, resulta posible implementar en una bacteria el operador lógico más sencillo: una puerta lógica NOT, o inversor.

Circuitería lógica intracelular

Un inversor electrónico genera como señal de salida el bit opuesto al que recibe de entrada: si se trata de un 0, producirá un 1, y viceversa. Un inversor genético consta de un gen controlado por un promotor *constitutivo*; es decir, uno que se encuentra activo en todo momento, por lo que la transcripción del gen tiene lugar de manera ininterrumpida. En un inver-

sor genético, la señal de entrada se identifica con la presencia o ausencia de un represor: un factor de transcripción que se une al promotor y lo bloquea. Así, en ausencia del represor («0») se sintetiza la proteína codificada por el gen («1»), mientras que, en presencia del primero («1»), se bloquea la síntesis de la segunda («0»). Este diseño básico constituye la base del desarrollo de biocircuitos electrónicos más complejos.

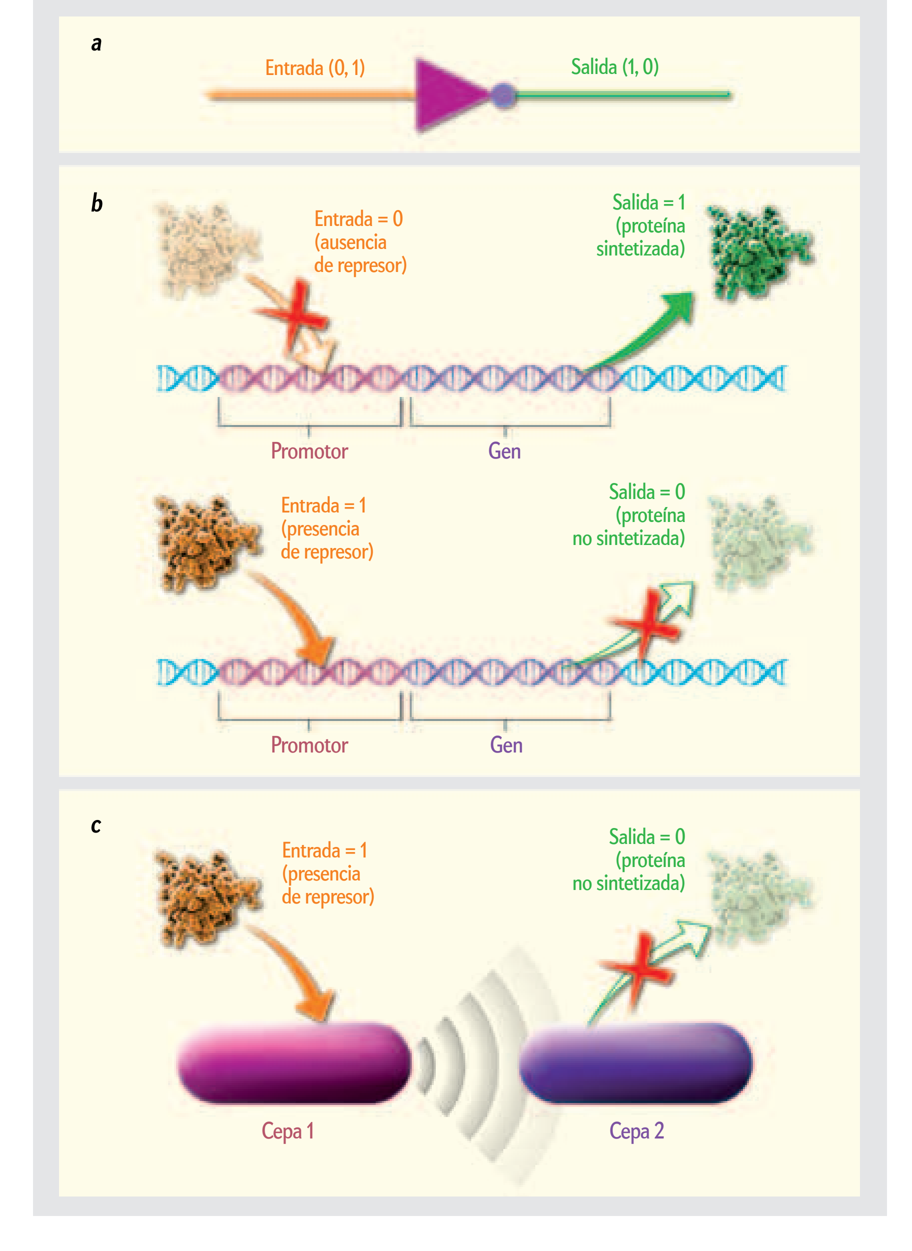
El empleo de varios genes, promotores y factores de transcripción permitió obtener, en el año 2000, dos resultados pioneros en la implantación de circuitos en células vivas. Uno de ellos, bautizado como *repressilator*, lograba que la bacteria *Escherichia coli* se comportase como un reloj. Para ello, se dispusieron varias parejas promotor-gen conectadas en círculo. La proteína sintetizada por un gen actuaba como represora del promotor siguiente, gracias a lo cual la expresión de cada gen oscilaba de manera periódica. Además, una de las parejas contenía un gen adicional que codificaba una proteína de fluorescencia verde. Como resultado, la bacteria emitía luz verde de manera intermitente.

El segundo circuito emulaba el funcionamiento de un interruptor que podía emplearse como almacén rudimentario de memoria. Dos genes con sendos promotores constitutivos se elegían de tal manera que la proteína expresada por cada uno de ellos reprimiese al promotor del segundo. El dispositivo alcanzaba así un estado de equilibrio en el que solo uno de los genes permanecía activo. Para «pulsar el interruptor», bastaba con introducir en la célula el represor del gen activo. Ello accionaba la expresión del segundo y modificaba el estado de la memoria.

CIRCUITOS DE PROTEÍNAS Y ADN

Un inversor electrónico es un dispositivo lógico que genera a la salida el bit opuesto al que recibe como entrada (*a*). En un inversor genético, la señal de salida se identifica con la proteína sintetizada por un gen; la de entrada, con un represor que inhibe la expresión génica (*b*). Este mecanismo básico constituye la base para la construcción de otros circuitos biológicos más complejos.

La investigación actual persigue implementar funciones lógicas en poblaciones de bacterias (*c*), lo que permitiría aumentar las posibilidades de procesamiento. Ello puede lograrse empleando diferentes cepas modificadas genéticamente y controlando las señales químicas de comunicación celular.



Dispositivos poblacionales

Con el objetivo de ampliar las posibilidades de procesamiento, durante los últimos años la comunidad científica ha centrado su atención en la computación distribuida en una población heterogénea de bacterias. A modo de analogía, podemos pensar en una serie de ordenadores conectados en red: si todos ellos fueran idénticos, las funciones del conjunto sufrirían bastantes limitaciones; por el contrario, con una distribución de tareas (servidores, enrutadores, etcétera) las posibilidades aumentan. En lo que respecta a los circuitos biológicos, este objetivo requiere controlar las capacidades de comunicación y colaboración entre bacterias.

En un trabajo reciente, publicado en *Natural Computing* y realizado junto a Fernando Arroyo y Juan Castellanos, de la Universidad Politécnica de Madrid, y Miguel Redondo Nieto, de la Universidad Autónoma de Madrid, diseñamos un circuito lógico en una población con tres cepas bacterianas por medio del control de las señales químicas de comunicación celular. Nuestro modelo implementaba en la población de bacterias el funcionamiento de un circuito lógico XOR, o disyuntor exclusivo. En otra investigación realizada el año pasado, junto a Martyn Amos, de la Universidad Metropolitana de Manchester, diseñamos un oscilador multicelular basado en los modelos de sincronización de cliente y servidor que

se emplean habitualmente en las comunicaciones entre ordenadores conectados en red. Estos resultados fueron publicados en la revista *ByoSystems*.

Otros grupos que hoy en día exploran el desarrollo de funciones complejas en poblaciones de bacterias son los de los investigadores Christopher A. Voigt, de la Universidad de California, y Ricard Solé, de la Universidad Pompeu Fabra. La combinación de ambos niveles, el interno y el externo, constituirá el siguiente paso en la creación de circuitos naturales.

En Europa, un interesante y ambicioso proyecto de investigación, BACTOCOM (www.bactocom.eu), trata de construir un dispositivo de cómputo que opere con bacterias en lugar de con silicio y microprocesadores. ¿Hasta dónde llegará esta ciencia emergente? ¿Qué aplicaciones veremos en el futuro? Sin duda, merecerá la pena seguir de cerca sus resultados durante los próximos años.

—Ángel Goñi Moreno
Universidad Metropolitana de Manchester

CIENCIA COLABORATIVA

Todos a bordo

Gracias a la ayuda de miles de voluntarios, el proyecto Old Weather estudia los diarios de navegación de la Primera Guerra Mundial para perfeccionar el registro climático del planeta

Kathy Wendolkowski solía dedicar su tiempo libre a la repostería. Durante el último año y medio, sin embargo, ha pasado entre dos y tres horas diarias en la página web de Old Weather (www.oldweather.org). Allí transcribe los datos de temperatura, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento según fueron registrados en el diario de navegación del *Foxglove*, un dragaminas británico que patrulló el sur del Pacífico durante la Primera Guerra Mundial y los años siguientes. Un amigo que se dedica a la historia naval le habló del proyecto en octubre de 2010; poco después, Wendolkowski ya era adicta. Según confiesa, no tanto por los datos meteorológicos en sí como por las historias sobre el viaje y la tripulación.

Old Weather constituye una de las iniciativas que solicita la ayuda de voluntarios para recopilar datos a los que, de otro modo, no podría accederse. Según Philip Brohan, paleoclimatólogo y director del proyecto, un transcriptor profesional hubiera necesitado unos 28 años para realizar el trabajo que los voluntarios de Old Weather llevaron a cabo durante los seis primeros meses. Al igual que otros investigadores, Brohan analiza los datos meteorológicos del pasado con vistas a pronosticar el clima futuro: «Cada vez que hay una gran tormenta, la gente se pregunta si se debe al impacto humano sobre el clima. ¿Se trata de situaciones inusitadas u ocurría también antes? Para responder a tales preguntas, debemos conocer cómo ha cambiado el tiempo en el pasado».

Numerosos archivos en todo el mundo contienen vastos registros meteorológicos tomados por barcos, expediciones científicas y estaciones de investigación coloniales. La extracción de esos datos, a menudo garrapateados en una caligrafía difícil de leer por medios informáticos, ha sido considerada durante largo tiempo una tarea inviable. En 2009, sin embargo, Brohan conoció a Chris Lintott, astrónomo y fundador de Galaxy Zoo (www.galaxyzoo.org), una iniciativa que comenzó reclutando a internautas para que ayudaran a clasificar como elípticas o espirales las imágenes de cientos de miles de galaxias. Ambos se percataron de que esta apelación a la colaboración ciudadana podría emplearse en climatología. Tras conseguir financiación por parte del Gobierno británico, Old Weather vio la luz.

El portal comenzó con 4000 bitácoras procedentes de 256 buques de la Marina Real británica que zarparon durante la Primera Guerra Mundial y los años siguientes (una cantidad de datos equivalente a 250.000 singladuras). El período escogido se debía, en parte, a la magra cosecha de datos meteorológicos que provocó el conflicto. Tras acceder al portal e identificarse, los usuarios eligen una nave y acceden a una de las páginas del diario correspondiente, cuyos datos deben intro-



El *Foxglove*, un dragaminas británico que patrulló el Pacífico Sur entre 1915 y 1945.

ARCHIVOS NACIONALES, INGLATERRA (*barco y diario de navegación*); MARK WEAVER (*ilustración*)

ducir en una serie de ventanas emergentes. Al finalizar, lo más habitual es que continúen con la página del día siguiente. Para localizar y minimizar errores, cada registro se transcribe de manera independiente por tres voluntarios. La información se incorpora después a los registros de la Agencia Nacional del Océano y la Atmósfera de EE.UU. (NOAA), donde quedan a disposición de los científicos de todo el mundo. Según Brohan: «Si contásemos con una imagen completa de la meteorología de los últimos 200 años, podríamos situar el clima actual en el contexto adecuado y, con ello, poner a prueba los grandes modelos que estamos diseñando para predecir el cambio climático».

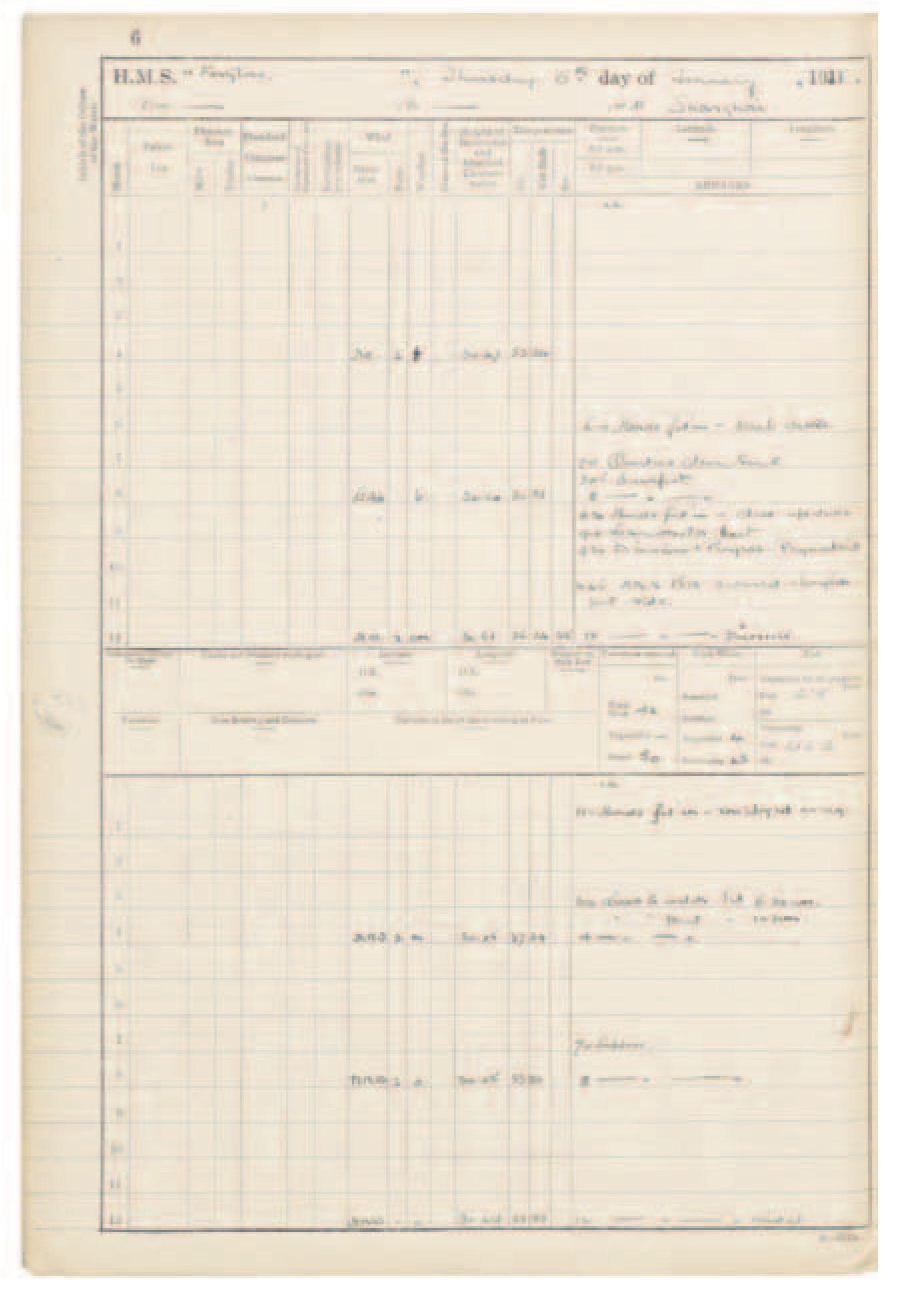
Aunque Old Weather se ha inspirado en proyectos anteriores, como Galaxy Zoo, el esfuerzo que exige de cada usuario es mucho mayor. En Galaxy Zoo los voluntarios solo debían examinar una imagen y pulsar un botón para clasificar la galaxia como espiral o elíptica, una tarea que un programa informático puede realizar con una tasa de aciertos del 80 por ciento. En cambio, Old Weather pide introducir la fecha, la posición de la nave y otros siete datos meteorológicos que, por lo general, se registraban media docena de veces al día. Mientras que para clasificar una galaxia bastan pocos segundos, descifrar la página de un diario puede llevar entre dos y tres minutos.

Por fortuna, no faltan razones para seducir a los voluntarios. Brohan calcula que, aunque hasta ahora hayan contribuido unos 11.000, pocos lo han hecho preocupados por el cambio climático: la mayoría se sienten atraídos por las historias de a bordo. Los diseñadores del portal explotaron este reclamo por medio de un sistema de incentivos que permite a los usuarios ascender de «cadete» a «teniente» y, por último, a «capitán», según el número de páginas que hayan transcrito. Existen también foros en los que los participantes pueden comentar las hazañas de sus navíos: los sepelios marítimos y la epidemia de gripe de 1918 y 1919 constituyen dos ejemplos de las docenas de hilos temáticos existentes. Además, el proyecto se asoció con el portal Naval-History.net con el objetivo de aprovechar toda la información ajena a la meteorología que los voluntarios iban sacando a la luz.

Todo lo anterior atrajo poderosamente a Kathy Wendolkowski, quien optó por un barco de poco relumbre con la esperanza de que otros lo dejasen de lado: «Todo el mundo se lanza a los grandes navíos; yo prefería uno que no llamase la atención». Comenzó a transcribir los diarios del *Foxglove* desde mediados de 1921 en adelante. En primavera del año pasado ya había llegado al año 1923 y estaba a punto de ser ascendida a capitana del buque. Wendolkowski ha llegado a contactar con la embajada británica y con la Academia Naval de Annapolis para que la ayuden a traducir acrónimos obsoletos y a identificar naves que no se encuentran en el registro histórico. No obstante, lo que de veras la impulsa a continuar son los partidos de fútbol y críquet, las salidas al cine y las tragedias ocasionales que acompañan a los registros meteorológicos. Eso, y el sistema de ascensos, que fomenta la competitividad: «Estoy en el puesto 92 de la lista de transcriptores», explica Wendolkowski, quien, a pesar de haber completado casi 5000 asientos, se ha visto obligada a ceder el mando del *Foxglove*.

No le faltarán oportunidades para ascender. Tras casi acabar con los diarios iniciales, Old Weather está añadiendo centenares de cuadernos más; muchos de ellos, procedentes de las primeras expediciones al Ártico.

—Kalee Thompson


6

H.M.S. ... day of ...

Una de las páginas de los diarios de navegación del *Foxglove*.

ARCHIVOS NACIONALES, INGLATERRA

GENÉTICA EVOLUTIVA

Aborígenes, conquistadores y esclavos

El análisis de los marcadores genéticos de herencia uniparental arroja luz sobre la evolución genética de los moradores de las islas Canarias desde los tiempos prehispánicos hasta la actualidad

La conquista de las «Islas afortunadas» se inicia por parte de la Corona de Castilla en el siglo xv. Y es que, a diferencia del resto de los archipiélagos de la Macaronesia, el archipiélago canario estaba habitado cuando los colonizadores arribaron a sus costas.

Los cronistas europeos relataron que los isleños, los guanches, desconocían la navegación, por lo que habrían permanecido culturalmente aislados y desarrollado costumbres y dialectos propios, pero también apreciaron similitudes culturales y lingüísticas con los bereberes del norte de África. Desde entonces numerosos estudios arqueológicos, antropológicos y lingüísticos han apoyado la tesis sobre el origen norteafricano de los aborígenes canarios.

Marcadores uniparentales

Los primeros estudios genéticos efectuados en poblaciones canarias actuales corrieron a cargo de nuestro equipo de la Universidad de La Laguna, encabezado por Vicente M. Cabrera. En estos trabajos se caracterizó la población canaria actual por medio de diversos marcadores genéticos. Los resultados más llamativos correspondieron a los marcadores de herencia uniparental: el ADN mitocondrial y la región no recombinante del cromosoma Y. El primero es heredado por los descendientes exclusivamente por vía materna, mientras que el segundo solo lo transmiten los padres a sus hijos varones. El resto del material genético se hereda a partes iguales de ambos progenitores y sufre complejos procesos de recombinación que dificultan la determinación de su procedencia. En cambio, los marcadores uniparentales permanecen inalterables y permiten reconstruir la historia de los linajes maternos y paternos de una población de forma independiente.

Sexo distinto, suerte desigual

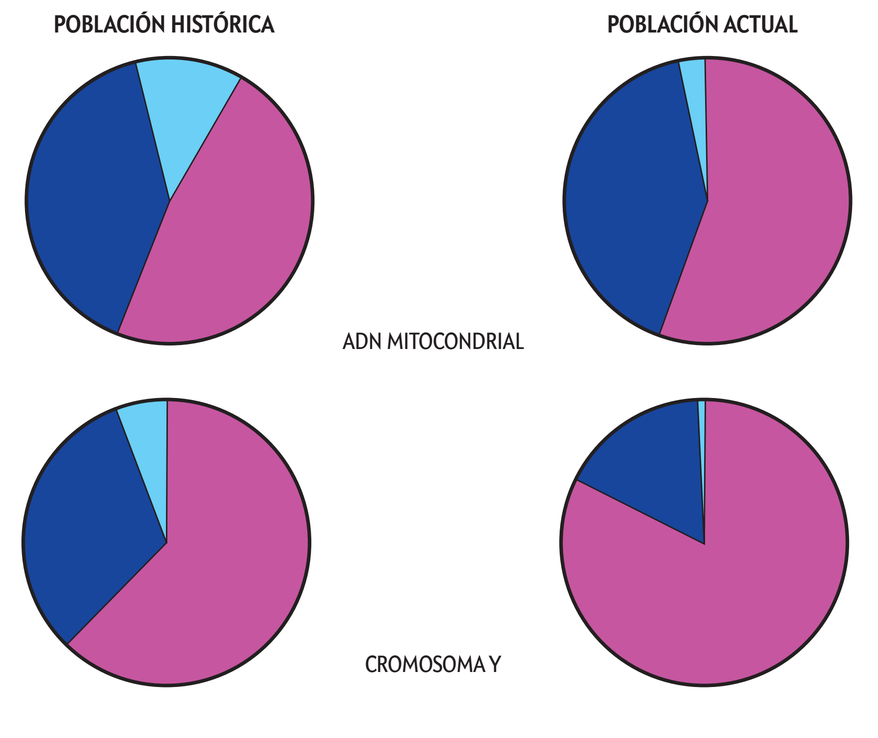
Los estudios de los marcadores uniparentales en la población canaria contemporánea han constituido el tema de sendas tesis doctorales, la de Juan Carlos Rando, versada en el ADN mitocondrial, y la de

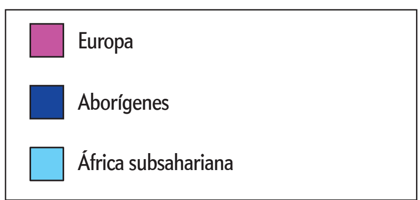


MATILDE ARNAY

Restos aborígenes excavados en la isla de Tenerife.







Aportación aborigen, **europea y subsahariana a la población canaria histórica (siglo XVIII) y actual, determinada por el análisis del ADN mitocondrial y del cromosoma Y. La aportación aborigen femenina (círculos superiores, azul oscuro) ha permanecido invariable hasta hoy, a diferencia de la masculina que se ha visto notablemente reducida (círculos inferiores, azul oscuro). Por su parte, la aportación subsahariana (círculos de la izquierda, azul claro), sustancial en ambos sexos durante el siglo XVIII merced al tráfico de esclavos, es hoy muy reducida.**

Carlos Flores sobre el cromosoma Y. Los resultados de ambas desvelaron la presencia de dos linajes típicos de las poblaciones bereberes del norte de África, a saber, el haplogrupo U6 del ADN mitocondrial y el haplogrupo E-M81 del cromosoma Y, hallazgos que refuerzan la teoría del origen norteafricano de los aborígenes canarios. Además, se descubrió un subtipo del haplogrupo U6, denominado U6b1, que parece autóctono de las islas, puesto que no se ha detectado en el continente. Pero el resultado más sorprendente se obtuvo al comparar las frecuencias relativas de ambos marcadores en Canarias con las de sus dos poblaciones parentales más importantes (la península Ibérica y el norte de África). La comparación puso de manifiesto la existencia de una marcada asimetría sexual en la pervivencia de los referidos linajes norteafricanos en la población actual. Así, mientras el ADN mitocondrial materno mostró una contribución norteafricana del 30 por ciento, los linajes paternos resultaron ser europeos en un 90 por ciento. Estos primeros trabajos no solo apuntalaron la teoría del origen norteafricano de los aborígenes canarios, sino que constataron una mayor pervivencia del colectivo femenino, probablemente debido a un mayor efecto negativo de la conquista sobre los varones.

Contribución forzada

Es de sobras conocida la importante arribada de esclavos de origen norteafricano y subsahariano acaecida en Canarias tras la conquista. Este hecho histórico quedó refrendado por los análisis genéticos, que revelaron la presencia de linajes típicos del África negra, con una aportación subsahariana a la población canaria actual que se calcula en un 3 por ciento en los linajes maternos y en menos de un 1 por ciento en los paternos. Sin embargo, salvo en lo tocante al marcador U6b1, la influencia de los esclavos norteafricanos no pudo diferenciarse de la aportación aborigen, puesto que ambas poblaciones comparten su origen geográfico. Por esa razón, quedaba la duda de si los linajes norteafricanos existentes en la actualidad eran de procedencia aborigen o si se debían a la posterior llegada de esclavos bereberes. Es más, tampoco podía descartarse la presencia del marcador U6b1 en alguna población esclavizada del continente que todavía no hubiera sido muestreada.

Por suerte, los avances en las técnicas de la genética molecular logrados en los últimos años han posibilitado el estudio del material genético extraído de restos arqueológicos. De ahí que nos planteásemos la conveniencia de analizar el ADN de restos aborígenes. En la tesis doctoral de Nicole Maca Meyer se caracterizaron por primera vez los linajes maternos mediante el análisis del ADN mitocondrial de restos aborígenes procedentes de todas las islas, así como de una muestra de una población del siglo XVIII exhumada en la iglesia de La Concepción de Santa Cruz de Tenerife. La idea era comparar las muestras aborígenes del siglo XVIII y actuales con el fin de establecer la evolución genética de la población canaria a lo largo del tiempo. Se confirmó que el haplogrupo U6b1 ya estaba presente con una alta frecuencia en la población aborigen. Este y otros linajes maternos hallados en los restos aborígenes presentaron sus mayores similitudes con los bereberes de Marruecos. Por su parte, la población del siglo XVIII resultó similar a la actual, aunque con una aportación subsahariana superior al 10 por ciento, lo cual confirma la influencia del tráfico de esclavos en esa época.

Pervivencia femenina

Años más tarde, en mi tesis, realicé el análisis del cromosoma Y en restos aborígenes e históricos del siglo XVIII. El estudio de los linajes paternos de la población guanche corroboró su origen norteafricano, con la presencia del haplogrupo E-M81 y otros, como el E-M78 y el J-M267, muy abundantes en las poblaciones bereberes. Además, como sucedió en el caso del ADN mitocondrial, también se detectaron linajes subsaharianos en la población del siglo XVIII, relacionados con la trata de esclavos. Un nuevo cálculo de las aportaciones a la población canaria actual efectuado con los resultados de la población aborigen indica que su contribución materna ha permanecido constante desde tiempos históricos hasta la actualidad, mientras que los linajes paternos han descendido desde el siglo XVIII hasta nuestros días. Estos resultados, publica-

Ya en su quiosco dos nuevos monográficos



Descubra las bases neurobiológicas y los aspectos socioculturales de las **emociones** en la segunda entrega de *CUADERNOS*, nuestra colección sobre los grandes temas de la psicología y las neurociencias.



Con ocasión del centenario del nacimiento de **Alan Turing**, el nuevo número de la colección *TEMAS* repasa su obra a través de las repercusiones que esta ha ejercido en la filosofía de las matemáticas, la computación, las teorías de la mente o la biología del desarrollo.



Prensa Científica, S.A.

dos en *BMC Evolutionary Biology* en 2009, confirman que la conquista y colonización del archipiélago afectó de forma dispar a la población aborigen femenina y masculina, probablemente debido a una mayor mortandad de los varones durante los enfrentamientos armados y, después, el menor estatus social de los aborígenes (que pudo favorecer las uniones entre mujeres descendientes de aborígenes y varones de ascendencia europea). También se constató que el impacto de la introducción de esclavos subsaharianos ha ido disminuyendo hasta el presente, en este caso afectando por igual a hombres y mujeres.

Resta pendiente el análisis de un número suficiente de muestras aborígenes de cada una de las islas, con objeto de establecer si existen diferencias insulares que puedan esclarecer otra gran incógnita pendiente de resolución: ¿Cómo se produjo la llegada a las islas Canarias de una población aborigen que, en tiempos de la conquista, desconocía el arte de la navegación?

—Rosa Fregel
Dpto. de genética
Universidad de La Laguna

ACUICULTURA

Avances en la domesticación del atún rojo

El cultivo de la especie a escala industrial, junto a un sistema de capturas responsable, contribuiría a la recuperación de las poblaciones naturales

El atún rojo es una especie emblemática que viene alimentando a las poblaciones del Mediterráneo desde hace milenios. En los últimos años, debido sobre todo a una fuerte demanda de los mercados asiáticos, las poblaciones de esta especie se han visto reducidas de forma alarmante, lo que ha llevado a organismos internacionales como la Comisión Internacional para la Conservación del Atún del Atlántico (CICAA) a establecer una estricta regulación para limitar de manera drástica sus capturas [*véase* «El atún rojo en peligro», por Richard Ellis; Investigación y Ciencia, mayo de 2008]. Por otro lado, con el objetivo de sentar las bases para producir atún rojo mediante técnicas de acuicultura integral, en enero de 2008 se puso en marcha el proyecto SELFDOTT (acrónimo, en inglés, de «Del cultivo basado en capturas al cultivo independiente y la domesticación del atún rojo, *Thunnus thynnus*»).

El proyecto tiene un presupuesto total de 4,4 millones de euros (3 de ellos cofinanciados por el 7.º Programa Marco de la Unión Europea) y es coordinado en nuestro país por el Instituto Español de Oceanografía (IEO). También participan el Centro de Investigación Marina de Grecia, el Instituto Francés de Explotación del Mar (IFREMER), la Universidad Heinrich-Heine de Düsseldorf, el Centro Nacional para la Maricultura de Israel, la Universidad de Cádiz, la Universidad de Bari, el Centro Maltés de Ciencias Pesqueras (MCFS), el Centro Nacional para la Investigación Científica de Francia (CNRS), la Universidad de Montpellier II y el Centro de Investigación de Acuicultura Skretting (SARC) en Noruega, perteneciente a la multinacional Nutreco, uno de los grupos empresariales más importantes a nivel mundial en la producción de alimento para peces. Además, se cuenta con la participación del grupo empresarial español Ricardo Fuentes y la empresa maltesa Malta FishFarming.



Alevín de atún rojo de 45 días de vida, de 10 centímetros de talla y 8 gramos de peso, nacido y criado en cautividad.

FOTOGRAFÍAS CORTESÍA DEL AUTOR

Los objetivos del proyecto se basan en tres pilares fundamentales: la reafirmación de los conocimientos actuales sobre la reproducción en cautividad de esta especie; el establecimiento de los conocimientos básicos para la obtención de puestas y el control del desarrollo larvario, y la creación de las bases necesarias para el desarrollo de alimentos adecuados desde el punto de vista de la eficacia y el respeto al ambiente.

Obtención de huevos

En la primera fase del cultivo del atún resulta esencial la obtención de huevos en cautividad. Con ese fin, el grupo Ricardo Fuentes y Malta FishFarming mantienen en sus instalaciones individuos reproductores. Desde junio de 2007 se dispone de un stock de unos 30 reproductores de atún rojo frente a El Gorguel (Cartagena). Los peces se ubican en una jaula circular de 25 metros de diámetro y 20 metros de profundidad, provista de un bolsillo de malla de 2 centímetros de luz para evitar en lo posible la entrada de pelágicos que depreden los huevos liberados. Los atunes son alimentados una vez al día, a saciedad, con estornino (*Scomber japonicus*) y caballa (*Scomber scombrus*). En la isla de Malta, la empresa Malta Fishfarming mantiene otro stock de reproductores en condiciones semejantes.

Para la recogida de huevos, se coloca en la época de puesta (entre junio y julio) una cortina de entre 4 y 6 metros de altura que rodea por completo la parte superior de la jaula. La cortina retiene los huevos fertilizados, que flo-

tan, e impide que sean arrastrados por las corrientes fuera de la jaula. Durante la puesta, las temperaturas del agua oscilan entre los 21 y los 26 ºC. En los años 2008 y 2009 se utilizaron implantes hormonales para inducir el desove. Estos se introdujeron en los peces con la ayuda de un arpón submarino, según la técnica desarrollada en un proyecto anterior (REPRODOTT).

En julio de 2008 no se recogieron puestas, probablemente debido a que se colocó la cortina demasiado tarde. En 2009 se obtuvieron por primera vez enormes cantidades de huevos fértiles (140 millones de huevos a lo largo de 17 días). En 2010 y 2011, en los que se ubicó la cortina mucho antes, se recolectaron puestas de forma espontánea, sin necesidad de implantes. En 2010 se obtuvieron 60 millones de huevos a lo largo de 40 días y, en 2011, 162 millones durante un período de tiempo semejante.

Los huevos, recogidos entre las 3 y las 7 horas de la mañana de la superficie de la jaula mediante salabres con malla de 500 micras, son trasladados a la Planta de Cultivos del IEO en Mazarrón (Murcia) para evaluar su cantidad y calidad y, a continuación, proceder a su eclosión y cultivo larvario. Asimismo, se han realizado con éxito envíos de huevos a los socios del proyecto en Francia, Grecia e Israel. Por su parte, el laboratorio maltés del MCFS se ha nutrido de las puestas del stock de reproductores de Malta Fishfarming. El número de huevos recolectados fue muy inferior al de Cartagena, aunque suficiente para llevar a cabo los experimentos previstos en el citado centro. La tasa de eclosión de los huevos fue en la mayoría de los casos superior al 90 por ciento.



Los huevos de atún rojo, retenidos por la cortina (*azul*), se recolectan con la ayuda de un salabre provisto de malla de 500 micras.

Cultivo larvario

Para el cultivo larvario se han ensayado las técnicas de «pseudo agua verde» (*pseudogreen water*), mesocosmos y agua clara. Las dos primeras coinciden en el uso de microalgas en los tanques de cultivo, pero se diferencian en el tamaño de los tanques (de 1 a 5 metros cúbicos en el primer caso y de 20 a 40 en el segundo) y en la densidad inicial de larvas (de 20 a 50 larvas por litro en el primer caso y de 0,5 a 10 en el segundo). En la técnica de agua clara no se utilizan microalgas, las densidades larvarias iniciales son altas y, como en el primer caso, los tanques presentan un tamaño reducido.

La estrategia de alimentación larvaria ha consistido en rotífero y artemia enriquecidos con ácidos grasos, proteínas y vitaminas, y larvas de dorada recién eclosionadas. Asimismo, se están llevando a cabo experimentos de destete con la alimentación artificial desarrollada por el SARC.

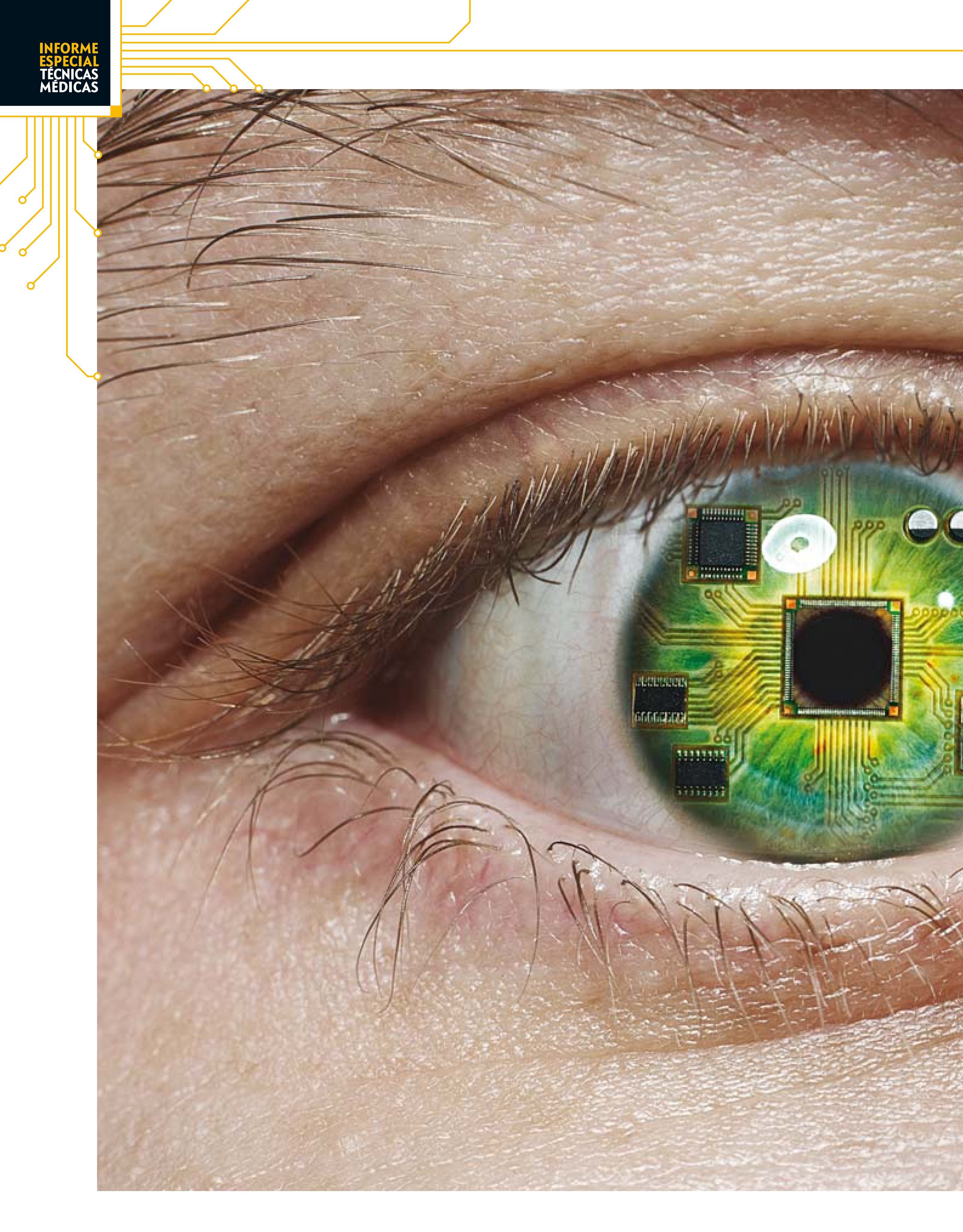
Los cultivos larvarios realizados en la Planta de Cultivos Marinos del IEO en Mazarrón han resultado los más exitosos del proyecto. En 2009 se obtuvieron alevines de 73 días y 30 gramos de peso, y en 2010, de 110 días y 100 gramos de peso. Sin embargo, la mortalidad de esos dos primeros años fue total. En 2011, en cambio, se produjeron varios miles de alevines de 30 días de edad, que fueron ubicados en jaulas flotantes y que, desde entonces, han venido alimentándose con dieta artificial. Se espera que un buen número de ellos alcance el estado adulto tras un mínimo de cuatro años y pueda reproducirse, con lo que se cerraría el ciclo biológico de la especie en cautividad.

Alimentación artificial

Para el desarrollo de alimentos artificiales adaptados a la especie, el grupo SARC ha creado un pienso que sigue la misma línea de la alimentación de los alevines. Se ha ensayado en juveniles de atún capturados en el mar e introducidos a continuación en jaulas flotantes gestionadas por el grupo Ricardo Fuentes. El pienso ha sido bien aceptado por la especie y los crecimientos obtenidos han sido comparables a los registrados con alimentación a base de pescado, lo que abre la posibilidad de realizar la crianza de una forma más respetuosa con el ambiente, uno de los objetivos del proyecto.

Se espera en un futuro continuar con nuevos estudios que permitan avanzar en la domesticación del atún rojo. Como ocurre con la dorada, la lubina o el rodaballo, solo la producción independiente de la especie a nivel industrial, junto a un sistema de capturas responsable, puede hacer que las poblaciones naturales recuperen la estructura que tenían hace cientos de años, sin renunciar al consumo de la carne de este emblemático pez, en la cantidad y calidad que requiere un mercado cada vez más importante y exigente.

—Fernando de la Gándara
Proyecto Selfdott
Centro Oceanográfico de Murcia (IEO)



LA MEDICINA DEL FUTURO



DAN SAELINGER

Se exponen algunas de las técnicas médicas más prometedoras que se hallan hoy en desarrollo

Durante los últimos años, los avances sin precedentes logrados en los campos de la biología, la electrónica y la genética humana han permitido desarrollar un nuevo e impresionante conjunto de instrumentos para proteger y mejorar la salud humana. La tecnología médica moderna y el análisis de datos complejos están a punto de salirse de sus confines tradicionales del hospital y del ordenador del laboratorio para abrirse camino en nuestra vida cotidiana.

Los médicos del futuro utilizarán esas herramientas para supervisar a los pacientes y predecir cómo van a responder a determinados planes terapéuticos adaptados a su fisiología, en lugar de basarse en la respuesta media de grandes grupos de personas que participan en ensayos clínicos. Los avances en la miniaturización de chips, la bioingeniería y la ciencia de materiales están sentando las bases de los nuevos dispositivos, que tal vez lleguen a sustituir órganos complejos como el ojo o el páncreas, o al menos, les ayudarán a funcionar mejor.

Las páginas siguientes ofrecen un atisbo a algunos de los desarrollos más prometedores de la medicina personalizada en genética, visión artificial, oncología, sistemas de vigilancia implantables y neurociencia. Puede que no todos ellos vean la luz. Pero en conjunto hacen pensar que la tecnología médica desempeñará una función cada vez más importante no solo en el tratamiento de los enfermos, sino también en la supervisión de la salud de las personas sanas.



GENÉTICA

MEDICINA PERSONALIZADA

El costo de la secuenciación del genoma humano sigue cayendo, pero interpretar sus resultados todavía entraña una gran dificultad

Cuando se lanzó el Proyecto Genoma Humano, hace más de 20 años, el esfuerzo de imprimir el libro de instrucciones completo para construir un ser humano se esperaba que exigiría cientos de máquinas de secuenciación, un costo de tres mil millones de dólares y 15 años de duración. Trece años más tarde, en 2003, se anunció la primera secuencia «completa» del genoma. Pero ese logro trascendental todavía era una labor inacabada. Quedaban por rellenar grandes huecos en el mapa del material hereditario que configura el destino genético de una persona.

En enero se celebró en las Vegas la Feria Internacional de la Electrónica de Consumo. En medio de las consolas de videojuegos y televisores de pantalla plana había un secuenciador de genes, una elegante caja blanca del tamaño de una impresora de sobremesa. Sus inventores afirman que cuando salga al mercado a finales de año, el dispositivo obtendrá la secuencia genética completa de un individuo en solo unas pocas horas por el precio de unos 1000 dólares.

Durante años, ese coste se había considerado el punto de inflexión que marcaría el comienzo de una nueva era de la medicina personalizada. A partir de entonces, las lecturas resultarían lo bastante baratas como para que cualquier médico pudiera diseñar, sobre la base de los riesgos genéticos individuales y sensibilidades farmacológicas, el tratamiento de pacientes con una cardiopatía, cáncer u otras patologías. Los observadores de la industria argumentan que, a medida que los secuenciadores genéticos como el expuesto se van extendiendo, el análisis genético exhaustivo de la población humana se halla cada vez más cerca.

Pero algunos dicen que una implantación generalizada de la técnica resultaría prematura. A Aravinda Chakravarti, profesor de genética en la Universidad Johns Hopkins, le preocupa que se hayan exagerado los posibles beneficios de la medicina genómica personalizada. Según él, las personas no se dan cuenta de que los análisis genéticos completos, ya sean llevados a cabo por un médico o contratados en línea, de momento casi carecen de utilidad médica.

El principal problema radica en el rápido avance de la técnica, que ha superado la capacidad de los investigadores para interpretar los resultados. La lectura genética de cada individuo debe compararse con la de un sinfín de personas. De este modo se pueden descubrir los patrones genéticos indicadores de una enfermedad y los que se pueden ignorar. Además, muchas dolencias están causadas por mutaciones raras que todavía no se han identificado. Por último, la simple labor de ordenar el enorme conjunto de datos arrojados por una exploración del genoma es ingente. Si bien hoy generar la secuencia resulta rápido y barato, su análisis no será ni lo uno ni lo otro, comenta Euan A. Ashley, profesor de cardiología en la Universidad Stanford.

Para demostrar la complejidad del proceso, Ashley y algunos investigadores de las universidades Stanford y Harvard analizaron el genoma de su compañero Stephen Quake, profesor de bioingeniería. Necesitaron seis meses para hacerlo, a pesar de que Quake había secuenciado antes su propio genoma, por lo que ya disponían de los datos brutos con que trabajar.

Los antecedentes familiares de Quake incluían varios casos de cardiopatía. En efecto, el equipo descubrió que poseía diversas variantes genéticas asociadas a un mayor riesgo de infarto. Sin embargo, el análisis genético produjo algunos resultados inesperados, entre ellos, una mayor probabilidad de padecer cierto trastorno hereditario, la hemocromatosis, aunque nadie en la familia de Quake lo sufriera. En este punto, es imposible saber si el resultado inesperado refleja un peligro real o algún tipo de error en el proceso de secuenciación, el equivalente genético a un error tipográfico.

A pesar de los fallos, Ashley se muestra optimista acerca del potencial de las lecturas individualizadas del ADN para transformar la atención médica. Imagina el día en que el genoma de una persona representará una parte habitual de la historia clínica electrónica. Sin embargo, hasta ahora, los pocos pacientes que han sacado un provecho del análisis de grandes partes del genoma padecían enfermedades raras, con variantes genéticas que eran lo bastante infrecuentes como para destacar. Pero la mayoría de nosotros aún deberemos aguardar algún tiempo para conocer los secretos que encierra nuestro genoma. *—Nancy Shute*

VISIÓN ARTIFICIAL

EL OJO BIÓNICO

Fotorreceptores sintéticos que devolverán la visión a los ciegos

Miikka Terho conoce la diferencia entre una manzana y un plátano. Puede afirmar que la primera es redonda y dulce, y cruje al morderla, y el segundo es alargado y curvado, y se convierte en puré si se deja madurar durante mucho tiempo. Pero si se le pide que distinga un fruto del otro sin tocarlos, olerlos o probarlos, se siente perdido. Terho es totalmente ciego. Sin embargo, durante tres meses, en 2008, recuperó la capacidad de diferenciar con la vista una manzana de un plátano, gracias a un pequeño chip que se le implantó en el ojo izquierdo. Aunque breve, el éxito inicial de la nueva técnica ha cambiado para siempre las perspectivas de Terho y de muchos otros como él.

Terho, que trabaja para una organización finlandesa que consigue becas deportivas en EE.UU., sufre retinitis pigmentaria, una afección genética que destruye las células fotosensibles que revisten la retina en la parte posterior del ojo. Hasta los 16 años presentó una visión normal, pero a partir de entonces su visión nocturna comenzó a fallar. A los 20 años, su capacidad de ver durante el día también se deterioró. A los 35 Terho había perdido la visión central de ambos ojos. A los 40, únicamente percibía indicios de luz en la periferia de su campo de visión.

Todo cambió en noviembre de 2008, cuando Eberhart Zrenner, de la Universidad de Tübingen, integró en la retina de Terho un chip que reemplazó a los fotorreceptores (los conos y bastones) dañados. En una retina sana, los fotorreceptores transforman la luz en impulsos eléctricos que finalmente llegan al cerebro después de atravesar varias capas de tejido especializado, uno de ellos compuesto por las células bipolares. Cada una de las 1500 celdas del chip, dispuestas en una cuadrícula de unos tres por tres milímetros, contiene un fotodiodo, un amplificador y un electrodo. Cuando la luz incide sobre uno de los fotodiodos, genera una pequeña corriente eléctrica que se refuerza por el amplificador adyacente y se canaliza al electrodo, que a su vez estimula la célula bipolar más cercana. Esta envía en última instancia una señal al cerebro a través del nervio óptico. Cuanta más luz incide sobre un fotodiodo, mayor es la corriente eléctrica resultante.

El implante retiniano abrió ante Terho una ventana cuadrada al mundo de unos 20 centímetros de lado, situada a menos de un metro de su rostro. A través de esa ventana Terho pudo distinguir las formas básicas y los contornos de personas y objetos, especialmente si presentaban un fuerte contraste entre los colores claros y oscuros. Sin embargo, el implante no contenía electrodos suficientes como para producir imágenes nítidas. Además, el chip le permitió percibir solo sombras en gris en lugar de en color, debido a que no podía distinguir entre diferentes longitudes de onda de luz.

A pesar de tales limitaciones, el implante cambió de forma radical el modo en que Terho interaccionaba con el mundo en los días posteriores a la cirugía. Por primera vez desde hacía diez años, podía ver y nombrar objetos como los cubiertos y la fruta, leer cartas en letra grande y reconocer a sus seres queridos. Otros dos pacientes que recibieron implantes en la misma época consiguieron localizar objetos brillantes colocados sobre fondos oscuros.

Zrenner tuvo que retirar los chips después de tres meses porque el diseño hacía a los pacientes vulnerables a las infecciones cutáneas: una batería de bolsillo externa suministraba la energía a los amplificadores del ojo a través de un pequeño cable enroscado dentro de la piel, lo que dejaba una herida abierta. Además, los usuarios necesitaban estar cerca de un ordenador que controlara de forma inalámbrica la frecuencia de los impulsos eléctricos, así como aspectos de la visión tales como el brillo y el contraste.

Desde el año 2008, Zrenner ha creado un implante más seguro que confiere una mayor movilidad. El último modelo, implantado de momento en diez personas, es inalámbrico. Por debajo de la piel, un cable delgado recorre, desde una bobina electromagnética situada detrás de la oreja, una corta distancia hasta el chip situado en la parte posterior del ojo. Otra bobina electromagnética alojada en una pequeña caja de plástico, colocada encima de la piel cerca de la oreja, completa un circuito eléctrico que proporciona energía al implante. Al manipular los controles de la bobina externa, los pacientes pueden modificar el brillo y el contraste. Para mejorar la técnica, Zrenner quiere implantar en una retina tres chips, uno junto al otro, de modo que los individuos tengan un mayor campo visual.

Aunque los fotorreceptores sintéticos deberían resultar útiles en cualquier forma de ceguera provocada por un daño en los fotorreceptores (retinitis pigmentaria, coroideremia y algunos tipos de degeneración macular), no pueden ayudar a las personas con glaucoma u otras afecciones que degraden el nervio óptico.

Otro equipo ha logrado un éxito semejante al de Zrenner. Second Sight, con sede en California, ha desarrollado un implante retiniano, el Argus II, que también trata la retinitis pigmentaria, aunque con un enfoque diferente. Captura imágenes del entorno con una pequeña cámara montada sobre unas gafas, convierte las imágenes en impulsos eléctricos y transmite estos a un electrodo que se coloca sobre la superficie de la retina. A diferencia del implante de Zrenner, el Argus II no imita la excitación normal de la retina por ondas de luz, sino que produce un mosaico de puntos brillantes y oscuros que los pacientes deben aprender a interpretar.

La restauración de la visión incluso en una escala de grises resulta cara. En la actualidad, el Argus II cuesta unos 100.000 dólares por ojo; los implantes de retina de Zrenner, una vez ensayados y autorizados, probablemente costarán otro tanto. Zrenner debe llevar a cabo más ensayos clínicos antes de que los consejos consultivos europeos le permitan instruir a otros cirujanos en el procedimiento. El Argus II ha sido aprobado para su venta en gran parte de Europa, pero todavía no en EE.UU. Sin embargo, el éxito de los primeros ensayos y la velocidad a la que avanza la técnica hacen pensar que los implantes de la retina podrían extenderse más en pocos años.

—Ferris Jabr

DETECCIÓN PRECOZ

IDENTIFICAR UN CÁNCER

Los bioingenieros están desarrollando nanopartículas programadas para detectar un tumor en sus primeras fases

Unas partículas minúsculas tal vez logren solucionar algunos de los mayores problemas de la medicina. Las nanopartículas, que miden del orden de nanómetros (una mil millonésima de metro), son tan pequeñas que 500 de ellas se podrían alinear a lo ancho de un cabello humano. Se están diseñando distintos tipos para que cumplan diversas funciones, desde la entrega de fármacos en partes específicas del organismo hasta la obtención de imágenes más detalladas de órganos internos. Ahora se están refinando para que puedan descubrir células cancerosas allí donde se escondan.

Las técnicas de imagen habituales detectan tumores una vez que han crecido lo suficiente como para poder observarlos. Las nanopartículas, en cambio, pueden hallar una sola célula cancerosa entre 10 millones de células normales. La detección experimental del cáncer de mama mediante nanomedicina ha logrado identificar tumores 100 veces más pequeños que los que se observan con la mamografía en estudios de laboratorio. Las nanopartículas, equipadas con proteínas o material genético específico del cáncer, también ayudan a distinguir entre neoplasias malignas e inflamaciones corrientes o lesiones benignas.

El equipo de Gregory Lanza, profesor de ingeniería biomédica de la Universidad de Washington en St. Louis, está desarrollando nanopartículas que señalan la presencia de vasos sanguíneos recién formados. Estos promueven de modo específico el crecimiento de tumores, una etapa clave en el desarrollo del cáncer de colon, mama y otros. Tal proliferación de vasos no suele producirse en el tejido sano. En teoría, la técnica también podría informar sobre la velocidad de crecimiento de un tumor, lo que ayudaría a los médicos a decidir la intensidad del tratamiento.

Sanjiv Sam Gambhir, profesor de radiología diagnóstica en la Universidad Stanford, se centra en el cáncer colorrectal. Intenta identificar tumores muy pequeños que una colonoscopia habitual pasaría por alto. Su grupo está creando nanopartículas fabricadas con oro y sílice, a las que añade moléculas que instruyen a las partículas para que se alojen sobre las células tumorales. Cuando las moléculas se unen a un tumor en el colon o en el recto, los minerales de las nanopartículas dispersan la luz de un endoscopio especializado y delatan así la presencia del cáncer.

Los ingenieros también intentan crear nanopartículas que lleven a cabo múltiples tareas, como poner de relieve tumores en imágenes de resonancia magnética, tomografía por emisión positrónica y otros análisis, e incluso administrar fármacos contra el cáncer. Esos nanodispositivos permitirían ver si un tratamiento llega a su objetivo y resulta eficaz. Incluso con los tratamientos actuales que actúan sobre las células cancerosas sin afectar a las normales, los médicos suelen desconocer la cantidad exacta de medicamento que alcanza al tumor.

Los esfuerzos para llevar las nanopartículas a la práctica clínica se enfrentan con algunos obstáculos. Habrá que demostrar que la técnica resulta inocua en los humanos. Sin embargo, según Gambhir, la principal dificultad en el tratamiento contra el cáncer es la falta de objetivo sobre el que actuar. Las nanopartículas pueden funcionar de modo muy complejo, pero no son mágicas. Las primeras etapas del crecimiento del cáncer no se conocen con la suficiente profundidad como para saber hacia qué moléculas se deben dirigir las partículas. Sin conocer los objetivos, «ni siquiera hemos dado el primer paso», comenta Lanza. Pero en el campo de la nanomedicina, que varios analistas de la industria han calculado que alcanzará en todo el mundo los 130.000 millones de dólares en 2016, la carrera para averiguarlo acaba de empezar.

—Katherine Harmon



TELEMETRÍA PERSONAL

PRODUCTOS IMPLANTABLES INTELIGENTES

Los nuevos sistemas inalámbricos de vigilancia advierten a los pacientes de un ataque cardíaco inminente o ayudan a controlar la diabetes

Los ingenieros biomédicos están desarrollando diminutos sistemas de vigilancia implantables que podrían mejorar de forma notable el tratamiento de los pacientes con afecciones crónicas, como cardiopatías o diabetes. Actualmente, se están probando en clínica varios dispositivos de este tipo, que envían de forma inalámbrica datos sobre regiones clave del organismo o la sangre a receptores externos. Con el tiempo, los productos implantables podrían desempeñar un papel más activo en el tratamiento. De este modo, no solo detectarían arritmias peligrosas, sino que también sacudirían un corazón detenido para reanimarlo. Un par de instrumentos en desarrollo tienen como objetivo dos de los problemas de salud más frecuentes:

Infarto de miocardio. Fabricado por Angel Medical Systems en Shrewsbury, Nueva Jersey, el AngelMed Guardian tiene el tamaño aproximado de un marcapasos y realiza un seguimiento del corazón, latido a latido. Está sintonizado para escuchar patrones anómalos, tales como un aumento rápido en el ritmo o un pulso irregular en las personas que han sobrevivido a un infarto reciente (por lo que presentan un mayor riesgo de sufrir otro), pero que no cumplen los requisitos para la implantación de un marcapasos o de un desfibrilador cardíaco. Si el dispositivo detecta otro ataque inminente, vibra y hace que un localizador externo emita pitidos y destellos que alertan al paciente o a otras personas. Para evitar falsas alarmas, el aparato debe detectar una alteración durante más de un minuto antes de lanzar un aviso. Estos y otros datos cardíacos registrados por el dispositivo pueden descargarse de forma inalámbrica a un ordenador para su posterior análisis. Angel Medical ha autorizado la técnica a una empresa que fabrica desfibriladores cardíacos implantables. La combinación de ambos avances permitirá que un dispositivo administre una corriente eléctrica al corazón si el sistema de vigilancia detecta signos de paro cardíaco o una arritmia peligrosa, al tiempo que envía los resultados del electrocardiograma a un médico.

Niveles anómalos de glucosa. Un nuevo sensor de glucosa implantable fabricado por GlySens, en San Diego, puede ofrecer algún día a millones de diabéticos un sistema de control inalámbrico sobre su nivel de glucosa. El dispositivo toma lecturas casi continuas del valor de glucosa debajo de la piel del paciente, dato que se correlaciona luego con el nivel en sangre. La información registrada, más precisa y completa, permite establecer la posología y el momento de administración de la insulina mucho mejor que la obtenida con pinchazos en los dedos. Y debido a que el sensor se implanta en el cuerpo, necesita menos mantenimiento que los actuales sistemas externos de vigilancia.

«Queremos ofrecer al paciente y a la familia un producto del que se olviden para que puedan cen-

DAN SAELINGER



trarse en la información», dice Joseph Lucisano, bioingeniero y también presidente y director ejecutivo de GlySens. El tratamiento de la diabetes y de otras enfermedades crónicas se basa en la supervisión, reconocimiento y optimización de los patrones de señales, añade. De modo que contar con una conexión inalámbrica que proporcione un gran volumen de datos a un costo mínimo permitirá avances seguramente impredecibles.

Puede que los sensores inalámbricos incluso resulten más complejos en el futuro. Se ha desarrollado un instrumento delgado y flexible que, aplicado como un tatuaje provisional en la piel o en el interior del cuerpo, registra la frecuencia cardíaca, las contracciones musculares e incluso las ondas cerebrales. Ha sido diseñado por mc10, una empresa de Cambridge (Massachusetts) que crea equipos electrónicos flexibles. El circuito futurista está pensado para ser totalmente portátil, con una fuente de alimentación interna y un transmisor inalámbrico. Con toda probabilidad, la combinación de la monitorización inalámbrica de los órganos internos y el dispositivo ajustable a la forma del órgano ofrecerá pronto a los pacientes y a los médicos información instantánea acerca de una amplia gama de afecciones crónicas que durante mucho tiempo han sido difíciles de tratar.

—K. H.

NEUROCIENCIA

ANÁLISIS SANGUÍNEO EN PSIQUIATRÍA

Los niveles de ciertas proteínas podrían servir para diagnosticar la esquizofrenia y la depresión

Sabine Bahn quiere cambiar el modo en que los psiquiatras diagnostican los trastornos mentales graves. Ha dedicado los últimos 15 años a analizar la sangre y el cerebro de pacientes con esquizofrenia y trastorno bipolar en busca de proteínas que indiquen la predisposición de una persona a sufrir tales afecciones. Las moléculas, denominadas biomarcadores, prometen una forma mucho más objetiva de identificar las enfermedades mentales que el enfoque habitual, en que el diagnóstico se basa sobre todo en las conductas que los pacientes comunican.

Aunque los biomarcadores han mejorado los métodos de diagnóstico de numerosas dolencias, entre ellas la diabetes y las cardiopatías, han demostrado menor utilidad en las enfermedades psiquiátricas. Sin embargo, Bahn, que dirige un laboratorio en la Universidad de Cambridge, y unos pocos neurocientíficos están convencidos de que los biomarcadores se convertirán pronto en un elemento indispensable para el diagnóstico en psiquiatría. Dos de esos análisis de sangre, uno de ellos basado en la investigación de Bahn, ya están disponibles en el mercado.

En 1977, Bahn empezó a examinar tejido cerebral conservado de hombres y mujeres esquizofrénicos que habían fallecido. Descubrió que, en comparación con el tejido de personas sanas, las muestras presentaban niveles anormalmente altos o bajos de al menos 50 proteínas. Diecinueve de ellas intervenían en la función de las mitocondrias, los pequeños orgánulos productores de energía en las células. Bahn también observó que las neuronas de los esquizofrénicos no podían utilizar la glucosa de forma eficiente, por lo que recurrían a una molécula diferente (el lactato) como fuente alternativa de energía.

En 2006, Bahn halló diferencias bioquímicas semejantes en el líquido cefalorraquídeo y en la sangre de pacientes vivos con esquizofrenia. En dos de sus investigaciones más recientes, tras examinar los niveles de 51 proteínas sanguíneas, distinguió las personas esquizofrénicas de las sanas con una precisión de un 80 por ciento. Entre estos biomarcadores se hallaba el cortisol (la hormona del estrés) y cierta proteína, el factor neurotrópico derivado del cerebro (BDNF), que estimula el crecimiento de nuevas neuronas y las conexiones entre las ya existentes.

El laboratorio Myriad RBM, situado en Austin (Texas), ha desarrollado VeriPsych, un análisis sanguíneo para la esquizofrenia, valorado en 2500 dólares, que mide la cantidad de varias proteínas identificadas por Bahn. Aunque la prueba no ha recibido la autorización de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de EE.UU., los psiquiatras pueden utilizarla como parte de su práctica médica.

Del mismo modo, Ridge Diagnostics, con sede en San Diego, ha desarrollado un análisis de biomarcadores para la depresión que la empresa proporciona a través de un laboratorio de Carolina del Norte a un coste de 745 dólares. Se trata del MDDScore (MDD corresponde a las siglas en inglés de «trastorno depresivo mayor»), que busca en la sangre 10 biomarcadores, entre ellos el BDNF y el cortisol.

Esas pruebas aún no se han validado en ensayos clínicos, aunque sí en pequeños estudios financiados por las propias empresas. Sin embargo, unos pocos psiquiatras han hallado en ellos un instrumento útil para distinguir la esquizofrenia de una psicosis temporal inducida por drogas o para ayudar a los pacientes deprimidos a aceptar la realidad de su afección y la necesidad de tratamiento.

—F. J.

PARA SABER MÁS

Medicina personalizada: **www.genome.gov/13514107**
El ojo biónico: **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2801810**
Identificar el cáncer: **nano.cancer.gov**
Dispositivos implantables inteligentes: **www.ted.com/talks/eric_topol_the_wireless_future_of_medicine.html**
Análisis sanguíneo en psiquiatría: **www.nap.edu/catalog.php?record_id=11947**

Jerry Adler ha sido redactor de *Newsweek* desde 1979 hasta 2008. Ha escrito sobre diversos temas relacionados con la ciencia, entre ellos, los perfiles de Stephen Hawking y Sally K. Ride.



NEUROCIENCIA

BORRAR LOS RECUERDOS DOLOROSOS

Nuevas terapias, conductistas o farmacológicas, podrían atenuar o suprimir la impronta cáustica de una experiencia traumática

Jerry Adler

En una especie de tiovivo de paredes transparentes, la rata gira lentamente dentro de un pequeño recinto. Al mirar al exterior, el animal ve una serie de marcas en las paredes que le permiten determinar su posición. Llegado a cierto lugar, se le administra una descarga en las patas, un refuerzo negativo según la jerga experimental. Cuando eso ocurre, el múrido da bruscamente media vuelta y huye sin cesar de aquel punto del habitáculo. Lo hará hasta el agotamiento.

¿Cómo lograr que la rata se detenga? Observemos que no bastaría suprimir la descarga, porque la rata no está dispuesta a entrar en la zona de peligro. El animal precisa, bien de una intervención que lo ayude a olvidar el miedo, o bien de una señal antagonista, de seguridad, que se imponga a su temor y modifique su repuesta.

Pensemos ahora en quienes han sido heridos en combate y sufren de ese conjunto de síntomas, impreciso pero muy real, conocido como trastorno de estrés postraumático (TEPT). Esas personas asocian determinados contextos o estímulos (espacios abiertos, muchedumbres, un estruendo súbito) con experiencias dolorosas y rehúyen tales circunstancias siempre que pueden. Se sienten tan atrapadas como la rata, incapaces de averiguar por sí mismas que la situación ha cambiado y ya no entraña peligro.

La rata del carrusel y el veterano de guerra son prisioneros del recuerdo, del extraordinario poder del dolor para forjar una huella indeleble en el cerebro, sea este de mamífero, reptil o invertebrado. Y mientras una parte de la ciencia se esfuerza por resolver el misterio de la pérdida de memoria, propia de la demencia, otra está abordando un problema que constituye la imagen especular del primero: cómo ayudar a los pacientes a librarse de los dolorosos recuerdos que dominan su vida diaria, débanse o no a estrés postraumático. Un nuevo punto de vista plantea que algunas neurosis tan dispares como fobias, conductas obsesivo-compulsivas, e incluso adicciones y dolores irreductibles, corresponden a trastornos del aprendizaje y la memoria, o dicho de otro modo, del olvido.

Hay personas que jamás olvidan aquella ocasión en que una araña cayó en su vaso de leche. Otras no pueden dejar de asociar un «colocón» con ciertas situaciones o lugares. Se está descubriendo que la memoria no consiste en un mero almacenamiento pasivo de impresiones. Se trata de una actividad continua y dinámica en las células, un proceso psicológico incesante que puede modificarse con fármacos o mediante terapias cognitivas. Una excelente noticia para veteranos de guerra y víctimas de agresiones o accidentes. Aunque está por ver lo que ello supondrá para futuras generaciones de historiadores o abogados especialistas en indemnizaciones.

En el caso de la rata del tiovivo, cabe imaginar diversos métodos para extinguir su miedo. Podríamos dejar que caminara hasta el agotamiento y descubriera por sí sola que han cesado

FREDRIK BRODEN



las descargas, un proceso que los psicólogos denominan extinción. También se podría tratar de intervenir directamente sobre el cerebro de la rata, en concreto, sobre el hipotálamo, donde se forman y almacenan los recuerdos de lugares. Así procedió hace seis años Todd Sacktor, del Centro Médico Downstate de la Universidad estatal de Nueva York, basándose en un trabajo anterior realizado con André Fenton. Inyectó un compuesto llamado ZIP en el hipocampo de una rata previamente entrenada en el carrusel. Dos horas después la puso de nuevo a prueba y observó que el miedo había desaparecido.

Para comprender el experimento de Sacktor sobre el olvido es necesario indagar en qué consiste la memoria y ahondar en la posibilidad de desmontar los procesos de aprendizaje subyacentes a la recordación. Los neurocientíficos que estudian la memoria suelen centrarse en la potenciación a largo plazo, proceso en el que dos o más neuronas que se activan a la vez o en inmediata sucesión desarrollan un vínculo de sincronía que torna probable su futura descarga simultánea. En esencia, la neurona que codifica la experiencia de oír una explosión súbita y violenta queda asociada a otras que hacen al sujeto buscar protección y lanzarse al suelo.

La compleja bioquímica de la potenciación a largo plazo implica la proliferación de receptores de glutamato en la neurona postsináptica, que amplifican la señal electroquímica que traspasa el diminuto hiato que media entre neuronas. Pero como Sacktor explica, esos receptores son inestables, ya que se forman y desaparecen de manera continua. La persistencia de un recuerdo entraña la existencia de un proceso bioquímico activo que mantiene en su puesto a un complemento fijo de receptores.

Desde hace tiempo se suponía que la sustancia responsable de la memoria había de ser una proteína, porque ciertos fármacos que inhiben la síntesis de proteínas impiden la formación de recuerdos y el aprendizaje en animales. El laboratorio de Sacktor se centró en una compleja proteína quinasa, PMKzeta, una enzima que torna activas otras proteínas al añadirles un grupo fosfato. Sacktor afirma que PMKzeta contribuye a mantener los recuerdos; sin ella, la potenciación a largo plazo falla y el recuerdo se esfuma. PMKzeta posee un antagonista específico, ZIP (péptido inhibidor de PMKzeta, por sus siglas en inglés), la sustancia que Sacktor inyectó en el hipocampo de la rata para que olvidase el entrenamiento de aversión impartido en el carrusel. Por la mera inhibición de la acción conservadora de PMKzeta, ZIP actúa sobre la memoria como si estuviera reformateando un disco duro.

Por esa razón, no es probable que en breve plazo se ensaye el péptido ZIP en humanos como estrategia para suprimir recuerdos. Si pudiera modificarse químicamente para impedir que penetrara en el cerebro y confinar su acción a la médula espinal, podría utilizarse algún día para atenuar la reacción de hipersensibilidad de quienes sufren dolor crónico ante un golpe o pinchazo, una reacción que representa una forma de recuerdo. Para anular la evocación de recuerdos traumáticos se necesita un compuesto que posea la potencia de ZIP, pero la especificidad suficiente para suprimir de modo selectivo recuerdos concretos.

A primera vista, la solución a ese reto se antoja imposible, pues no parecen existir diferencias bioquímicas entre los buenos y los malos recuerdos de las que ZIP pudiera sacar partido. Algunas investigaciones en curso giran en torno a esta cuestión. Ninguna estrategia resulta lo bastante eficaz como para eliminar por completo un recuerdo negativo concreto, aunque algunas embotan en parte la angustia asociada a un acontecimiento desgraciado.

Se conjetura que el punto débil en el desarrollo del TEPT se hallaría en la consolidación, esto es, el proceso en que los recuerdos importantes de corta duración pasan a ser de larga duración. No resulta fácil cuantificar la divisoria entre unos y otros, pero sí ejemplificarla. Probablemente el lector recuerde lo que cenó anoche, pero no hace un año, a menos que se trate de un acontecimiento señalado, como su banquete de bodas o una comida que le envió al servicio de urgencias del hospital. Los recuerdos a largo plazo tienden a constituirse en torno a sucesos muy emotivos o aterradores. O de algún hecho que provoque la liberación de norepinefrina, un neurotransmisor que promueve la síntesis de proteínas en la amígdala. Como se ha demostrado en un experimento célebre, puede bastar sumergir una mano en agua helada para producir ese efecto.

Por igual motivo, si se lograra reducir la concentración de norepinefrina se podría interferir en la formación de recuerdos duraderos. Varios compuestos cumplen esa función; el más conocido de ellos es el propranolol, un betabloqueante ampliamente utilizado en el tratamiento de la hipertensión y el miedo escénico. Aunque todavía se está estudiando el intervalo en que tiene lugar la consolidación, este parece abarcar unas pocas horas. Hace unos diez años, Roger Pitman, neurocientífico de la facultad de medicina de Harvard, tuvo la idea de administrar propranolol a personas que acababan de sufrir un acontecimiento traumático (un accidente de automóvil o una agresión) para ver si la inhibición de la norepinefrina podría hacerlos inmunes al estrés postraumático.

Señalemos que Pitman no pretendía borrar el recuerdo del trauma en sí (esto es, la rememoración episódica y autobiográfica del suceso), sino solo atenuar la valencia emotiva que llevaba consigo. En teoría, tal proceder entrañaría un riesgo para la integridad psicológica del sujeto, objeción que sin duda se plantearía si se lograra alterar el contenido de los recuerdos, no solo su tonalidad emotiva. Mucho después de que la sociedad estadounidense haya aceptado el uso de fármacos para modificar el estado de ánimo o la consciencia, la memoria, el sagrario donde mora nuestro yo, debe seguir, a juicio de muchos, a salvo de toda manipulación. James McGaugh, de la Universidad de California en Irvine, uno de los precursores de

EN SÍNTESIS

Ciertas patologías, desde fobias hasta dolores, tienen su origen en recuerdos dañinos. La neurociencia ha intentado ordenar el conocimiento sobre la formación de recuerdos en el cerebro para invertir el proceso en pacientes abrumados por traumas físicos o psicológicos.

Cierto compuesto, el péptido ZIP, deja en blanco la memoria de una rata, pero actúa sobre todos los recuerdos, no solo sobre los perniciosos.

La administración de fármacos que rebajen la concentración de norepinefrina, una hormona asociada al estrés, podría atenuar la intensidad del dolor asociado a un trauma previsible o a una experiencia terrible recién sufrida.

Otra estrategia consistiría en manipular la historia personal. Durante la evocación de recuerdos antiguos, se podrían modificar los matices emotivos que los rodean mediante fármacos o terapias conductistas.

la investigación moderna sobre la memoria, asegura que todos los años debe debatir sobre esa cuestión con expertos en bioética. Estos dudan sobre la conveniencia de aminorar los recuerdos traumáticos, a pesar de la opinión contraria de las víctimas de traumas. «¿Por qué se consideran aceptables las buenas palabras —'Vamos, vamos, lo superará'— y no la administración de un fármaco?»

El propio McGaugh, en un experimento clásico realizado con su colaborador Larry Cahill, de la Universidad de California en Irvine, demostró en los años noventa que el propranolol podía afectar, si no a la exactitud de los recuerdos, sí al menos a la especificidad de recuerdos episódicos. Tal experimento se basó en el empleo de relatos ilustrados. McGaugh y Cahill presentaron a los probandos uno de dos relatos: uno hacía referencia a un niño atropellado por un auto, que exigía intervención quirúrgica urgente; el otro consistía en una descripción emotivamente neutra sobre una consulta en el hospital. Como era de esperar, el primer grupo recordó los sucesos con mayor detalle. Pero cuando se repitió el experimento tras administrar propranolol a los probandos, tal diferencia desapareció: ambas historias eran recordadas por igual.

Cabe imaginar el nerviosismo de fiscales y abogados expertos en reclamaciones por daños ante cualquier alteración de los recuerdos de las víctimas de delitos o accidentes. Aunque los hechos objetivos no sufran deterioro, unas lágrimas vertidas en el estrado de testigos pueden valer más que su peso en oro ante el jurado que ha de conceder indemnizaciones. Pero convendría también tener presente el estado de recordación hipernormal inducido por la norepinefrina. De hecho, lo más que puede hacer el propranolol es enrasar recuerdos de fuerte carga emotiva con los de acontecimientos neutros. Una estrategia que la víctima adoptaría siguiendo el consejo del médico, aunque no del abogado.

El primer informe de Pitman sobre la administración de propranolol a víctimas de sucesos traumáticos, publicado en 2002, ofrecía resultados alentadores sobre la práctica de valorar el riesgo de TEPT en los pacientes (algo así como una radiografía del estado mental) antes de que llegaran a la sala de urgencias, o al hospital de campaña, para que recibieran enseguida el tratamiento procedente. Pero un estudio de seguimiento efectuado en 2011 no pudo corroborar tal hipótesis, aunque sí puso de manifiesto la dificultad que reviste ese tipo de investigaciones en el mundo real. En un período de 44 meses, solo 173 pacientes de un total de 2014 cumplieron los criterios de inclusión en el estudio; los demás fueron rechazados a causa de la edad, enfermedades preexistentes o ausencia de traumas de suficiente intensidad. A esos obstáculos se suma la legislación federal estadounidense, que prohíbe a los investigadores dirigirse directamente al paciente; antes deben obtener la autorización de personal médico, por lo general un profesional de urgencias, quien suele tener otras ocupaciones más apremiantes. Pitman explica que no volverá a hacer un estudio sobre el propranolol si no puede administrarlo mucho antes, hecho que de momento no ve posible. Mientras tanto, se lamenta de no poder recomendar el medicamento a quien acaba de sufrir un accidente, por carecer de datos que confirmen su validez. Pero está convencido de las posibilidades del tratamiento. No obstante, puede que los fármacos no ofrezcan la única solución.

Considérese un sujeto que ocupa un asiento de un despacho de la facultad de medicina de la Universidad de Emory. En su mente revive sucesos de hace varios años, ocurridos a miles de kilómetros de allí, en Irak, al volante de un vehículo militar.



TED S. WARREN, AP PHOTO

Cambiar los recuerdos: Un sargento del ejército con TEPT prueba un sistema de realidad virtual ideado para aplacar miedos incontrolables asociados al combate.

La historia proyectada en los anteojos de visión virtual que lleva puestos, basada en sus recuerdos, es modificada por una terapeuta desde un teclado. En función de la narración que el sujeto le ofrece, la terapeuta sitúa un francotirador imaginario en un paso elevado, hace detonar un mina en la carretera o pone a correr siluetas ominosas por un callejón. El asiento salta con cada explosión. El sujeto jadea. Mira receloso a derecha e izquierda y se aferra a un volante imaginario. Rompe a sudar y alza un brazo para protegerse el rostro.

En cuanto el psicólogo ruso Ivan Pavlov descubrió el mecanismo de condicionamiento clásico, resultó natural preguntarse por el fenómeno inverso, la extinción: si se hace sonar la campana y no se le da comida al perro, ¿cuánto tiempo ha de pasar hasta que deje de salivar? No mucho, según se comprobó, lo que da pie a una pregunta todavía vigente: ¿Por qué con el tiempo el TEPT no desaparece por sí solo? Después de todo, el mundo está lleno de sonidos fuertes y repentinos que no suponen un ataque con morteros. Aun así, parece que algunas personas no llegan nunca a desaprender las respuestas que adquirieron en Afganistán, o incluso en Vietnam. Una posible explicación es que en el TEPT, la angustia y el sufrimiento constituyen un refuerzo negativo. Revivir el trauma original en las sucesivas rememoraciones provoca el dolor suficiente para mantener la respuesta inicial.

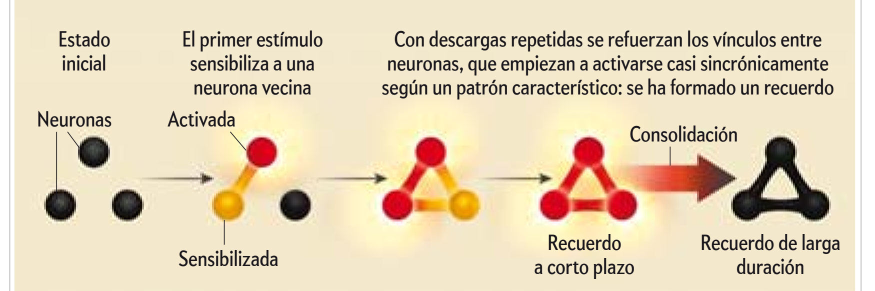
Bárbara Rothbaum, directora del programa de recuperación de traumas y ansiedad de la Universidad de Emory, explica a sus pacientes que es como si hubieran abierto un libro por una página indebida, y lo que habrían visto fuera tan aterrador que lo habrían cerrado de un golpe. De ese modo, nunca aprenden nada nuevo. Intenta, por tanto, que lean todo el capítulo. Al veterano sometido a una realidad virtual se le expone, en la medida de lo posible en tal simulacro, a la situación que lo traumatizó. Y aprovechando la proximidad del centro olfativo del cerebro y la amígdala, donde se procesan las emociones,

LIMPIAR LA MEMORIA

Aprender a olvidar

Una vez formados, los recuerdos de un trauma parecen volverse indelebles. Pero ahora se cree que estos se asemejan a los archivos de un disco duro, susceptibles de modificación, sobrescritura o eliminación. Para librar al cerebro de recuerdos perniciosos inducidos por acontecimientos vitales traumáticos sería necesario intervenir en distintas neuronas, cada una de las cuales se halla conectada con varios millares más.

Teniendo en cuenta el modo en que se forma un recuerdo, se están estudiando medidas bioquímicas y terapias conductistas que faciliten el olvido. El recuerdo surge cuando una serie de neuronas se activan juntas de un modo semejante, proceso que se denomina consolidación. Primero se activa una neurona en respuesta a un sonido, una percepción visual u otra señal, lo que provoca la descarga de una segunda neurona y, algo más tarde, de otras de su entorno. Luego, cuando cualquiera de esas células vuelve a ser estimulada, ni que sea débilmente, se activan también las otras neuronas de la red.



Borrar: Un recuerdo se elimina al desvincular neuronas que se hallan interconectadas. Ello implica desactivar una proteína, PKMzeta, que asegura que las conexiones interneuronales de la red se mantengan intactas. Otro compuesto, el péptido ZIP, ejerce un efecto contrario, al desconectar esas cadenas neuronales y suprimir el recuerdo. Todavía está por crear un método que actúe únicamente sobre recuerdos concretos. La ingesta sin más de una droga como ZIP provocaría la desaparición de todas las vivencias y recuerdos.



Atenuar: En lugar de limpiar por completo la memoria, algunos investigadores han tratado de debilitar las conexiones interneuronales en regiones cerebrales que registran o rememoran un suceso aterrador. Se han ensayado fármacos, como el betabloqueante propranolol, que, administrados antes de un terror previsible, o bien tras la rememoración de un suceso traumático, sirvan para atenuar el recuerdo doloroso.



Sustituir: Otra opción más consiste en remodelar el recuerdo. Se ha comprobado que cuando se evoca un recuerdo, este se puede manipular (mediante una intervención conductista o, tal vez en el futuro, mediante fármacos). El incidente del pasado se trae a la mente en un contexto seguro y, a continuación, se hace consolidar de nuevo bajo una luz emotiva diferente.



EMILY COOPER

Rothbaum introduce olores —un repertorio de aromas evocativos, como el de la pólvora, de comidas del Oriente Medio, de sudor y de basura— en el protocolo de realidad virtual.

Esa forma de tratamiento del TEPT representa una ampliación de las terapias que Rothbaum ha aplicado durante años a numerosos pacientes con fobia. Los expone de forma progresiva al objeto temido en contextos donde se sienten seguros: la palabra «serpiente», el dibujo de una serpiente, una serpiente en una jaula, y así sucesivamente. (Los terapeutas han incorporado a sus métodos la realidad virtual. Antes, para tratar la acrofobia, tenían que dar con ascensores de paredes transparentes; ahora pueden simular, sin apenas coste, balcones a mucha altura o, si lo desean, junglas llenas de serpientes y arañas.) El proceso de extinción llega a las profundidades de la amígdala, donde no penetra el pensamiento lógico, e implanta en ella un mensaje: nada hay que temer.

Aun así, la extinción resulta más complicada de lo que aparenta. Más que borrar un recuerdo de temor, parece consistir en un proceso de creación de un recuerdo nuevo, esta vez de seguridad, que compite con el trauma original. Según Michael Davis, colega de Rothbaum en la Universidad de Emory, el término extinción no es adecuado en este contexto. Si el organismo se somete a estrés o se sitúa en un entorno nuevo, el recuerdo aterrador puede volver; no ha desaparecido, como sí sucede en la extinción de una especie. Este hecho hizo surgir en los investigadores de la Universidad de Emory la idea de reforzar la extinción mediante un fármaco que, en aparente paradoja, acelera la adquisición de recuerdos. El principio activo aludido es la D-cicloserina, un antibiótico utilizado en la tuberculosis pero que también resulta eficaz en el cerebro, donde estimula una estructura, el receptor de NMDA, un tipo de receptor del glutamato. Se trata de un detector bioquímico de coincidencia, explica Davis, que se moviliza cuando las neuronas se activan a la vez. Despolariza la membrana celular de la neurona descendente, que admite iones de calcio y arranca la secuencia de reacciones que llevan a la potenciación de larga duración, a la formación de recuerdos y al aprendizaje.

Dada la facilidad con la que se adquieren recuerdos aterradores, Davis concluye que un único episodio turbador tiene que provocar una riada de esas reacciones en la amígdala. No hacen falta ayudas

para recordar un encuentro con un león, como sostiene el aforismo «Una vez mordido, siempre dolorido». La extinción, en cambio, parece haber evolucionado como un proceso lento. Se gana supervivencia recordando peligros, no olvidándolos. Mas, como dice Davis, si para curar a pacientes con fobia a los microbios se les hace tocar el asiento de un inodoro, la tasa de abandonos será francamente elevada. Si el tratamiento habitual requiere ocho sesiones, pero se puede lograr lo mismo en dos con la administración de D-cicloserina, la mejora resulta evidente. Se están efectuando ensayos clínicos para evaluar en qué medida la D-cicloserina podría acelerar la extinción en pacientes con TEPT. Pero, una vez más, tal vez se pueda prescindir de los medicamentos para borrar los malos recuerdos.

Los probandos se hallan frente a una pantalla de ordenador. Sobre sus dedos y muñecas se han fijado electrodos conectados a dos grupos de cables. Uno de ellos les administrará una descarga; el otro registrará la conductancia epidérmica, una medida estándar del temor. Los sujetos se hallan repartidos en tres grupos; los tres se someten al mismo condicionamiento, que les prepara para recibir una descarga asociada a la aparición de un cuadrado azul en la pantalla. Al día siguiente se inicia el tratamiento de extinción en los tres grupos, esto es, se les hace ver la figura repetidamente hasta que dejan de reaccionar ante ella. A dos de los grupos, sin embargo, se les ha expuesto antes a una prueba más: un recordatorio de 10 minutos en un grupo, y de 6 horas en el otro, antes de empezar el tratamiento de extinción. En la práctica, ese recordatorio equivale a una prueba de extinción: el sujeto ve la figura y no recibe una descarga. Pero en el cerebro, funciona de modo muy distinto. La clase de miedo condicionado, inducido por la descarga, suele resurgir de modo espontáneo tras la extinción; así lo experimentaron dos de los tres grupos un día después. En cambio, en el grupo que recibió el recordatorio 10 minutos antes, no hubo apenas reaparición espontánea; por alguna razón, la extinción resultó mucho más eficaz en ese grupo. De modo sorprendente, la diferencia subsistía incluso un año después.

¿A qué se debe ese efecto? La respuesta, según Elizabeth Phelps, en cuyo laboratorio de la Universidad de Nueva York se hizo el estudio, se halla en la teoría de la consolidación. Esta plantea que se necesitan varias horas para que los recuerdos, junto con su valencia emotiva, queden fijados en la memoria de larga duración. Se sigue entonces que durante cierto intervalo de tiempo estos pueden manipularse, algo que Pitman y sus colaboradores intentaron, sin éxito, en la sala de urgencias del Hospital General de Massachusetts. Un artículo hoy famoso, publicado en 2000 por Kim Nader (actualmente en la Universidad McGill, pero a la sazón en el laboratorio de Joseph E. LeDoux, de la Universidad de Nueva York), ha alentado nueva vida a una hipótesis anterior, casi desechada: la posibilidad de modificar los recuerdos antiguos tras ser recuperados de modo consciente. Así vista, la metáfora que mejor describe la memoria no es ni un diario ni una carpeta de recortes, sino el disco duro de un ordenador, que contiene archivos duraderos pero susceptibles de modificación cada vez que se recuperan. Los recuerdos son lábiles un tiempo después de ser evocados —de ahí que funcione el recordatorio en el experimento de Phelps— y sufren un proceso de reconsolidación tras varias horas.

Persiste el debate sobre el valor evolutivo de tal característica. La explicación más convincente es que permite actualizar los recuerdos con nueva información. No es lo mismo ser mordido por un león que, por ejemplo, una mangosta. Una vez superada la conmoción del ataque y curada la herida, la facultad de poder contemplar el pasado y distinguir entre ambos acontecimientos tiene un valor de supervivencia. Cuando Nader, LeDoux y Glenn E. Schafe, ahora en la Universidad de Yale, demostraron en 2000 que los mismos compuestos que inhiben en roedores la consolidación de recuerdos nuevos podrían borrar los ya existentes durante el intervalo de reconsolidación, dio comienzo la carrera para aplicar ese efecto en humanos.

Por desdicha, los principios activos utilizados en ratas, que inhiben la síntesis de proteínas, resultan tóxicos. Por ello, los investigadores se han orientado hacia fármacos como el propranolol y la mitaporona; la segunda inhibe la función del cortisol, otra hormona de estrés que se asocia a la formación de recuerdos con carga emotiva. Los resultados, hasta el momento, no son concluyentes debido a la dificultad de aislar un parámetro psicológico en organismos conscientes de sí mismos, con recuerdos y personalidades mucho más diversos que la mayoría de las ratas de laboratorio.

Merel Kindt, de la Universidad de Ámsterdam, informó hace pocos años que la administración de propranolol durante la reconsolidación reducía el miedo (medido por el potencial eléctrico en los músculos que controlan el parpadeo) en sujetos previamente condicionados a sentir miedo ante la foto de una araña. Pero Pitman comenta que todavía se está deliberando sobre la aplicación de este compuesto en humanos. Por ello provocó tanto revuelo el estudio sobre reconsolidación publicado en 2010 por Phelps y sus colaboradores, entre ellos la directora de la investigación Daniella Schiller, porque en su trabajo no utilizaban fármacos para lograr un efecto.

Los hallazgos de ese estudio apuntan a una técnica no invasiva que se puede aplicar con flexibilidad y seguridad en humanos para inhibir la reaparición de miedos. Además, el efecto logrado es específico para el recuerdo temible contra el que se dirige; no afecta a otros y persiste durante al menos un año. Los resultados fueron tan positivos que Phelps se siente obligada a advertir que el trabajo todavía se halla en su fase inicial. Desde el 2000 se han escrito cientos de artículos sobre experimentos con ratas, pero los realizados con humanos se cuentan en una mano. Desde los primeros estudios con animales se ha estado hablando como si el grupo de Phelps hubiera logrado curar el TEPT. No obstante, durante un decenio no se ha demostrado ningún efecto en personas. Ahora se ha dado un pequeño paso, pero han hecho falta siete años.

¿Será el propranolol la solución? ¿O lo será algún otro compuesto, no descubierto todavía, que combine, como Sacktor sueña, la potencia de ZIP con la especificidad de inhibición de la reconsolidación? LeDoux opina que la investigación sobre la memoria está a punto de dar sus frutos y de proporcionar tratamientos para trastornos tan incapacitantes como el TEPT. Pero si sopesamos los sufrimientos que este mal ha provocado en tanta gente, resulta difícil refutar la tesis de Barbara Rothbaum: «La primera medida preventiva contra el TEPT consiste en evitar las guerras».

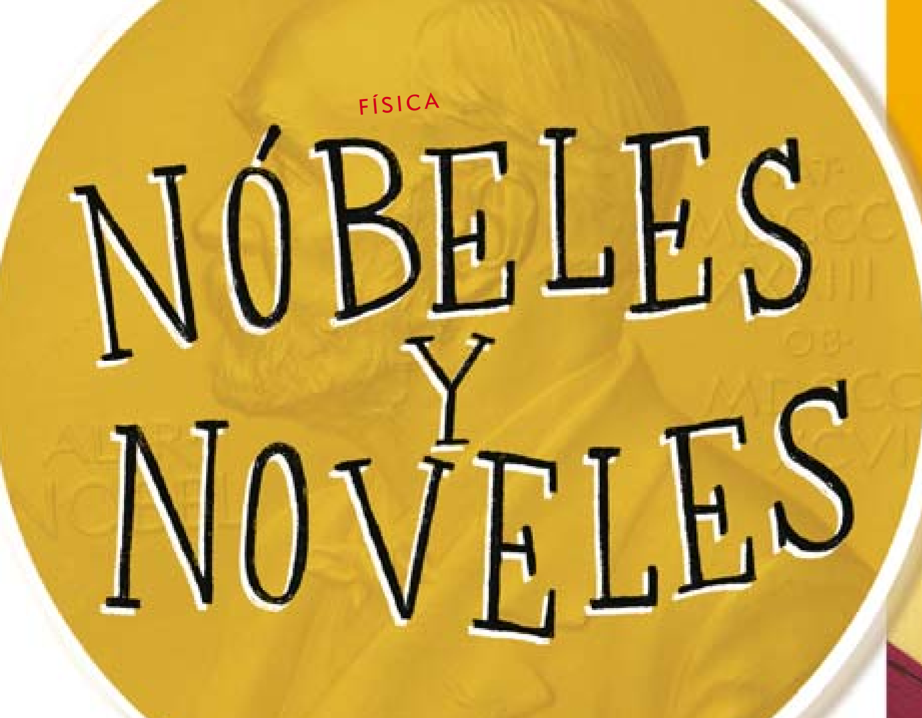
PARA SABER MÁS

PKMζ maintains spatial, instrumental, and classically conditioned long-term memories. Peter Serrano et al. en *PLoS Biology*, vol. 6, n.º 12, págs. 2698-2706, 23 de diciembre de 2008.

Preventing the return of fear in humans using reconsolidation update mechanisms. Daniela Schiller et al. en *Nature*, vol. 463, págs. 49-53, 7 de enero de 2010.

FÍSICA

NÓBELES Y NOVELES



Las herramientas son hoy otras, pero muchas de las cuestiones que avivaron la física del siglo pasado continúan aún vigentes

John Matson y Ferris Jabr
Ilustraciones de John Hendrix

Cada verano, la ciudad alemana de Lindau reúne a premios nóbel y jóvenes investigadores procedentes de todo el mundo. La sexagésima segunda edición de este encuentro, que tendrá lugar entre el 1 y el 6 de julio, estará dedicada a la física. A modo de homenaje hemos seleccionado doce pasajes que varios galardonados han escrito para nuestra publicación a lo largo de los años [aparecidos en *Scientific American* con anterioridad a 1976 y en Investigación y Ciencia después de esa fecha]. Estos comprenden desde la cosmología hasta la física de partículas, pasando por la tecnología.



A medida que recopilábamos el florilegio, nos sorprendió comprobar que buena parte de los problemas que hace decenios ocupaban a los físicos continúan estimulando la investigación actual. No cabe duda de que los tiempos han cambiado desde la época de Albert Einstein, Paul Dirac y Enrico Fermi. Desde entonces se han dado pasos de gigante, como la elaboración y refinamiento del modelo estándar de física de partículas, y han aparecido nuevos enigmas, como la energía oscura. Pero muchas de las cuestiones que hoy se abordan son, en su raíz, las mismas que azuzaron la física de entonces ¿Por qué abunda la materia sobre la antimateria? ¿Existe el bosón de Higgs, al que se cree responsable de dotar de masa a las partículas elementales? ¿Qué nos revela la «fantasmal acción a distancia» acerca del funcionamiento del universo?

La materia es ubicua. De materia se encuentra hecha esta revista, la mano que hojea sus páginas y el aire que la rodea. La antimateria, por el contrario, es extraordinariamente rara. Una circunstancia sin duda beneficiosa para nosotros, ya que partículas y antipartículas se aniquilan en cuanto entran en contacto. Sin embargo, materia y antimateria deberían haberse formado a partes casi iguales en los albores del universo. De algún modo, la primera prevaleció y permitió la formación de galaxias, sistemas planetarios y seres vivos. Los físicos llevan largo tiempo preguntándose qué inclinó la balanza hacia ese lado.

En 1956, Emilio G. Segrè y Clyde E. Wiegand describían en estas páginas el descubrimiento del antiprotón. El grupo de Segrè y Wiegand lo había identificado apenas un año antes en el Bevatrón, el antiguo acelerador de la Universidad de California en Berkeley. En reconocimiento por el hallazgo, Segrè compartiría en 1959 el premio Nobel con Owen Chamberlain, uno de sus colaboradores en Berkeley. La detección del antiprotón seguía a la del positrón, o antielectrón, descubierto en 1932 por Carl David Anderson. Su existencia había sido predicha a partir de la descripción matemática del electrón que Dirac había propuesto en 1930.

En ese camino que iniciaran Dirac, Anderson, Chamberlain y Segrè, los físicos han dado ya el siguiente paso: ensamblar átomos de antimateria para estudiar si su comportamiento difiere del de los átomos ordinarios. En el CERN, cerca de Ginebra, se combinan antiprotones y positrones para crear átomos de antihidrógeno. El año pasado, un grupo logró conservarlos durante varios minutos, un tiempo suficiente para analizarlos. Si se observase que la gravedad o la radiación interaccionan de manera diferente con la antimateria, el resultado podría ayudar a explicar la actual sobreabundancia de materia en el universo.

Por su parte, Martinus J. G. Veltman refería en 1987 la existencia de cierto problema con el modelo estándar, la teoría que describe el comportamiento de las partículas elementales. Faltaba aún por descubrir una partícula clave que se resistía a ser detectada. Sin ella, las masas del resto de las partículas resultaban difíciles de explicar.

Hablamos, por supuesto, del bosón de Higgs. Veinticinco años después de que Veltman aventurase la posibilidad de detectarlo en el Supercolisionador Superconductor (SSC, proyectado entonces en Texas), los físicos aún se hallan a la espera. El SSC no llegó a construirse, por lo que la búsqueda se ha trasladado al Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Los expertos esperan que a finales de este año haya datos suficientes para confirmar o refutar su existencia.

Pero el comportamiento de las partículas elementales ya había comenzado a desgranarse antes de que naciese el modelo estándar. En 1935, Einstein y dos autores más firmaron un artículo en el que advertían que, tal y como estaba formulada, la mecánica cuántica implicaba la existencia de incómodos fenómenos no locales: un observador que midiese las propiedades de una partícula en cierto lugar podría influir instantáneamente en el estado cuántico de una partícula distante, por muy alejada que esta se encontrase de la primera. Tal efecto se antojaba absurdo. Según Einstein y sus colaboradores, el fenómeno arrojaba dudas sobre la viabilidad de la mecánica cuántica.

Los experimentales tardaron varios decenios en verificar que, en efecto, las partículas pueden compartir ciertas conexiones no locales debido a un fenómeno denominado entrelazamiento cuántico. Hoy, los pares de fotones entrelazados se generan con facilidad. El fenómeno se ha extendido a átomos e incluso objetos macroscópicos, como obleas de diamante sintético. Pero el entrelazamiento no se reduce a una curiosidad de salón. Se cree que en el futuro permitirá comunicaciones y una capacidad de cómputo mucho más potentes que las que se logran hoy con los dispositivos más avanzados.

La clave de tales experimentos ha sido el láser, la linterna cuántica cuyos dóciles fotones pueden entrelazarse o manipularse para entrelazar otras partículas. En un artículo de 1961, Arthur L. Schawlow ensalzaba las formidables posibilidades del «máser óptico», que por entonces solo contaba un año de edad. En 1981, Schawlow recibió el Nobel por sus contribuciones al desarrollo de la óptica de láseres. Sus descendientes intelectuales, que han refinado los usos del dispositivo para estudiar el entrelazamiento cuántico, figuran con frecuencia entre los favoritos al galardón.

Puede que alguno de los futuros laureados se encuentre este año en la reunión de Lindau. ¿Hacia dónde nos llevará la física de su generación? Si la historia ha de servirnos como guía, quizás algunas pistas se dejen adivinar a partir de los logros de quienes han sido premiados durante las últimas décadas.

EN SÍNTESIS

Cada verano, el encuentro de Lindau congrega a premios nóbel y jóvenes promesas científicas. La reunión de este año, que se celebrará durante los primeros días de julio, está dedicada a la física.

A modo de homenaje, se recopilan a continuación extractos de doce artículos que otros tantos premios nóbel de física han escrito para esta publicación durante los últimos decenios.

Algunos refieren los descubrimientos que llevaron al premio; otros reflexionan sobre el futuro de la física o sobre cuestiones eternas. ¿De qué está hecho el universo? ¿Vivimos solos en él?

A pesar de la antigüedad de algunos artículos, en ellos se plantean un buen número de preguntas y reflexiones cuya vigencia para la investigación actual queda fuera de toda duda.

ASTROFÍSICA

El mensaje secreto de los rayos cósmicos



Por Arthur H. Compton

PUBLICADO EN JULIO DE 1933

PREMIO NOBEL EN 1927

El estudio de los rayos cósmicos ha sido calificado de «único en la física moderna por la sutileza de los fenómenos, las delicadas observaciones, las arriesgadas expediciones de los observadores, la minuciosidad del análisis y la amplitud de sus consecuencias». Estos rayos nos traen, creemos, un importante mensaje. Tal vez nos estén refiriendo la evolución de nuestro mundo o nos informen sobre la estructura íntima del núcleo atómico. Ahora nos hallamos enfrascados en un intento de descifrar ese mensaje.

Hace unos cinco años, dos físicos alemanes, Bothe y Kolhörster, realizaron un experimento con tubos de conteo que los convenció de que los rayos cósmicos serían partículas dotadas de carga eléctrica. De ser correcta, esta conclusión significaría que debería existir una diferencia en la intensidad de los rayos que llegan a diferentes regiones de la Tierra. Pues el planeta actúa como un gigantesco imán, el cual debería desviar las partículas electrizadas en su carrera hacia el suelo. El efecto habría de mostrarse menor cerca de los polos magnéticos y más acusado en el ecuador, lo que resultaría en una intensidad mayor conforme nos desplazásemos desde este hacia aquellos. Media docena de experimentos diseñados para detectar tales efectos no aportó datos concluyentes.

Llegados a ese punto, y gracias a la ayuda financiera de la Institución Carnegie, un grupo de investigadores de la Universidad de Chicago hemos organizado nueve expediciones durante los últimos 18 meses, las cuales nos han llevado a diversos rincones del globo para medir los rayos cósmicos, desde el nivel del mar a cimas de seis mil metros de altura en los Andes y el Himalaya. Dos diestros montañeros, Carpe y Koven, perdieron la vida en un glaciar en la ladera del imponente Monte McKinley, en Alaska, pero cosecharon los datos a mayor altitud jamás obtenidos tan cerca del polo.

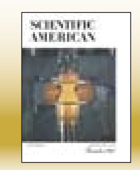
Tras reunir los resultados, hemos hallado que la intensidad de los rayos cósmicos en las inmediaciones del polo se muestra en torno a un 15 por ciento mayor que en el ecuador. Además, varía con la latitud, tal y como se había predicho, debido

al efecto del magnetismo terrestre sobre las partículas electrizadas. A altitudes elevadas, el efecto del magnetismo terrestre se revela varias veces mayor que a nivel del mar.

Dichos resultados demuestran que, al menos en una porción considerable, los rayos cósmicos se componen de partículas electrizadas. Algunos rayos cósmicos, no obstante, no se ven afectados de manera apreciable por el campo magnético terrestre. Otro tipo de mediciones, como las de Piccard y Regener, en sus vuelos con aeróstatos, y los experimentos de mesa de Bothe y Kolhörster, nos llevan a concluir que muy pocos rayos revisten forma de fotones, como la luz, pero que probablemente contengan una cantidad notable de radiación en forma de átomos o núcleos atómicos ligeros.

Deberíamos mencionar la tremenda energía de los rayos cósmicos. Tomemos como unidad el electrón-voltio. Un par de tales unidades se liberan al quemar un átomo de hidrógeno. Dos millones aparecen cuando el radio libera una partícula alfa. Pero se requieren diez mil millones de esas unidades para constituir un rayo cósmico. ¿De dónde procede tan tremenda energía? En la respuesta a esta cuestión quizá se halle la solución al enigma sobre cómo se originó el universo.

Estrellas de rayos X



Por Riccardo Giacconi

PUBLICADO EN DICIEMBRE DE 1967

PREMIO NOBEL EN 2002

Aunque el espacio interestelar se halla repleto de radiación que cubre todo el espectro electromagnético, desde las cortísimas ondas de los rayos X o gamma hasta las largas ondas de radio, solo una pequeña cantidad de esa radiación alcanza la superficie terrestre. Nuestra atmósfera obstruye el paso a la mayoría de las longitudes de onda. En particular, es opaca a longitudes de onda inferiores a los 2000 ángstroms, por lo que la radiación X del espacio exterior solo puede detectarse mediante instrumentos enviados a las regiones externas de la atmósfera, a bordo de globos sonda o cohetes.

Al tiempo que se hicieron más frecuentes los lanzamientos de cohetes y las oportunidades para enviar carga instrumental, Bruno B. Rossi, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, sugirió realizar un mapa del cielo en rayos X, por lo que nuestro grupo de la compañía American Science and Engineering emprendió el estudio.

El cohete Aerobee partió del campo de lanzamiento de misiles White Sands en la medianoche del 18 de junio de 1962. El experimento fue preparado por Herbert Gursky, F. R. Paolini y el autor, con la colaboración de Rossi. Poco antes de que el cohete alcanzara su apogeo a 225 kilómetros de altitud, abrió las compuertas de los detectores. Al girar el cohete en torno a su eje, estos barrieron una banda del cielo de 120 grados, la cual comprendía la ubicación de la Luna.

La telemetría de los detectores no indicó ninguna radiación X procedente de la Luna. Sin embargo, acusó la presencia de una intensa fuente de rayos X en la dirección de la constelación de Escorpio. La intensidad registrada fue un millón de veces mayor de lo que (a partir de la tasa de emisión del Sol) cabría esperar de una fuente cósmica distante.

Tres meses de atento escrutinio revelaron que el registro correspondía, en efecto, a la región de rayos X (longitudes de onda entre 2 y 8 ángstroms), que procedía del exterior del sistema solar y que la fuente se hallaba en la dirección aproximada del centro de nuestra galaxia. ¿Qué clase de objeto podía emitir tan potente flujo de rayos X?

Realizamos dos reconocimientos adicionales (en octubre de 1962 y junio de 1963) que, por triangulación, afinaron la localización de la poderosa fuente. Concluimos que esta no se hallaba en el centro de la galaxia. Mientras tanto, Herbert Friedman y sus colaboradores del Laboratorio Naval de Investigación consiguieron acotar su posición en un arco celeste de dos grados, lo que apuntaba a que el emisor era una única estrella, no un conjunto de ellas.

En aquel momento, los indicios de que la fuente consistía en un solo objeto se antojaban ya tan claros que lo bautizamos Sco (por Scorpius) X-1. Cabría esperar que un objeto que vertía tal cantidad de energía en forma de radiación X se mostrase como una estrella visible y de brillo considerable. Sin embargo, la región en la que se hallaba carecía de estrellas destacables.

El problema radicaba, por tanto, en identificar el astro de rayos X entre todos los visibles de aquella zona. La posición de Sco X-1 solo se conocía con una precisión de en torno a un grado, pero en esa región brillaban unas 100 estrellas de magnitud 13 por grado cuadrado. Se realizó un análisis detallado de los nuevos datos para delimitar la posición con mayor exactitud. El análisis redujo las posibilidades a dos ubicaciones, igualmente probables.

Conocidas tales localizaciones, el Observatorio Astronómico de Tokio, el de Monte Wilson y el de Palomar se lanzaron a la búsqueda telescópica de Sco X-1. Los astrónomos de Tokio la hallaron de inmediato. En menos de una semana, los observadores en Palomar confirmaron la identificación.

Ahora que Sco X-1 puede examinarse con telescopios ópticos, está comenzando a proporcionar una información sorprendente. El hecho que más llama a la reflexión reside en que la estrella emite una cantidad de energía mil veces mayor en forma de rayos X que en luz visible, algo que los astrónomos jamás habían previsto en sus estudios sobre las numerosas variedades de estrellas conocidas. Existen indicaciones de que la emisión en rayos X de Sco X-1 equivale a la producción total de energía del Sol en todas las longitudes de onda.

Así explota una supernova



Por Hans A. Bethe y Gerald Brown

PUBLICADO EN JULIO DE 1985

PREMIO NOBEL EN 1967 (BETHE)

Una supernova comienza con un colapso. ¿Cómo puede, entonces, expulsar la mayor parte de su masa? En algún momento, el movimiento de caída de la materia estelar debe detenerse e invertirse; la implosión debe transformarse en explosión.

Está empezando a perfilarse un cuadro coherente del mecanismo mediante una combinación de simulaciones con ordenador y análisis teóricos. Por lo que parece, el suceso crucial en el punto de retorno sería la formación de una onda de choque que se propagaría hacia fuera.

Cuando la parte central del núcleo estelar alcanza la densidad de los núcleos atómicos, el colapso se detiene de golpe.

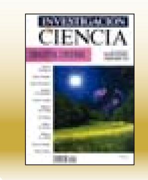
Esto da origen a ondas sonoras que se propagan hacia fuera a través del núcleo, como las vibraciones del mango de un martillo cuando golpea el yunque. Las ondas se retardan a medida que salen, porque la velocidad local del sonido disminuye y porque se propagan en contra de un movimiento de materia que se hace cada vez más rápido. En el punto sónico se detienen completamente. Mientras tanto, nueva materia está cayendo sobre la dura esfera de materia nuclear en el centro, lo que genera más ondas. En una fracción de milisegundo, las ondas se reúnen en el punto sónico, aumentando allí la presión. El salto de presión retarda la materia que cae a través del punto sónico y crea una discontinuidad en la velocidad. Tal variación discontinua constituye una onda de choque.

En la superficie de la esfera dura de la parte central, la materia que cae se detiene, aunque no instantáneamente. La cantidad de movimiento lleva el colapso más allá del punto de equilibrio, comprimiendo el núcleo central de la estrella hasta una densidad superior incluso a la del núcleo atómico. Llamamos a este punto el instante de «máximo quebranto». Después, la esfera de materia nuclear se recobra, como una pelota de goma que hubiéramos comprimido. La recuperación desencadena más ondas sonoras, que se unen a la creciente onda de choque en el punto sónico.

Una onda de choque difiere de una sonora en dos aspectos. Primero, la onda sonora no produce cambios permanentes en el medio donde se propaga; pasada la onda, la materia recupera su estado anterior. El paso de una onda de choque induce grandes modificaciones en la densidad, la presión y la entropía. Segundo, la onda sonora se mueve —por definición— a la velocidad del sonido; la de choque lo hace más deprisa, a una velocidad determinada por su energía. De aquí que, una vez que la discontinuidad de presión en el punto sónico ha crecido hasta convertirse en una onda de choque, no queda fijada ya en su lugar por la materia que cae. La onda puede continuar avanzando hacia fuera, a través de los estratos de la estrella. Según las simulaciones de ordenador, así lo hace, a una velocidad de entre 30.000 y 50.000 kilómetros por segundo.

Después de haber expulsado las capas exteriores, queda por decidir el destino del núcleo. La explosión de estrellas ligeras presumiblemente deja tras de sí una estrella de neutrones estable. En los cálculos de Wilson, cualquier estrella de más de unas 20 masas solares deja un residuo compacto superior a dos masas solares. Parece que el resto podría convertirse en un agujero negro, una región del espacio donde la materia se ha comprimido hasta una densidad infinita.

La vida en el universo



Por Steven Weinberg

PUBLICADO EN DICIEMBRE DE 1994

PREMIO NOBEL EN 1979

La vida tal como la conocemos sería imposible si, de varias magnitudes físicas, una sola tomara un valor algo distinto. La más conocida es la energía de uno de los estados excitados del núcleo de carbono 12. Hay un paso crucial en la cadena de reacciones nucleares que origina los elementos pesados en el interior de las estrellas. En él, dos átomos de helio se unen para formar el núcleo inestable de berilio 8, que algunas veces absorbe otro átomo de helio antes de fisionarse, dando lugar a carbono 12 en dicho estado excitado. El núcleo de carbono 12 emite entonces un fotón y decae al estado estable de menor energía. En subsiguientes reacciones, el carbono se transforma en oxígeno, nitrógeno y otros elementos pesados necesarios para la vida. Pero la captura de helio por berilio 8 es un proceso resonante, cuya tasa de reacción es una función, con un brusco pico, de las energías de los núcleos involucrados. Si la energía de ese estado excitado del carbono 12 fuera un poco más alta, su tasa de formación sería mucho menor, y los núcleos de berilio 8, en su mayoría, se fisionarían en núcleos de helio antes de que el carbono se constituyese. El universo aparecería entonces formado casi enteramente por hidrógeno y helio, sin los ingredientes de la vida.

Discrepan los autores sobre el grado de ajuste fino que la aparición de vida exige a las constantes de la naturaleza. Existen motivos para esperar un estado excitado del carbono 12 cerca de la energía resonante. Pero hay una constante que sí parece requerir un ajuste increíblemente fino: la constante cosmológica, o energía del vacío, antes aludida en referencia a las cosmologías inflacionarias.

Aunque no podemos calcularla, sí podemos evaluar algunos de los términos que contribuyen a ella, como la energía de las fluctuaciones cuánticas en el campo gravitatorio con longitudes de onda por encima de unos 10^{-33} centímetros. Estas contribuciones vienen a ser unos 120 órdenes de magnitud mayores que los valores máximos permitidos por la tasa actual de expansión del universo. Si las diversas contribuciones a la energía del vacío no se anularan por entero o casi, entonces, dependiendo del valor total de la energía del vacío, el universo completaría un ciclo de expansión y contracción antes de que la vida pudiera formarse, o bien se expandiría con una celeridad tal que no llegarían a generarse galaxias ni estrellas.

Así pues, la existencia de vida parece requerir que las contribuciones a la energía del vacío se cancelen con una precisión de 120 decimales. Es posible que, algún día, una teoría logre explicar dicha cancelación. De momento, lo mismo en teoría de cuerdas que en teoría cuántica de campos, la energía del vacío depende de constantes arbitrarias, cuidadosamente ajustadas para que la energía del vacío sea cuan pequeña exige la aparición de vida.

Todos estos problemas admiten una solución que no involucra la vida ni la consciencia en las leyes fundamentales de la naturaleza o en las condiciones iniciales. Pudiera ocurrir que las «constantes» de la naturaleza variaran de una parte del universo a otra. (Aquí, por «parte del universo» podemos entender varias cosas. La expresión podría referirse a distintas expansiones locales desatadas por episodios de inflación, en los cuales los campos que llenan el universo tomaran valores distintos, o podría aludir a los diferentes senderos cosmológicos que aparecen en algunas versiones de la cosmología cuántica.) Si fuera así, no sería sorprendente descubrir que la vida es posible en algunas partes del universo, aunque quizá no en la mayoría.

Naturalmente, cualquier ser vivo que evolucionara para poder medir las constantes de la naturaleza encontraría que sus valores permiten la existencia de vida. Las constantes tendrán otros valores en otras partes del universo, pero allí no hay nadie para medirlas. Ni siquiera entonces se asignaría a la vida un papel relevante en las leyes fundamentales, del mismo modo que el hecho de que el Sol tenga un planeta con vida no quiere decir que esta interviniera en el origen del sistema solar.

Partículas y átomos

¿Qué es la luz?



Por Ernest O. Lawrence y J. W. Beams

PUBLICADO EN ABRIL DE 1928

PREMIO NOBEL EN 1939 (LAWRENCE)

La luz es una de las realidades físicas más familiares. Todos conocemos muchas de sus propiedades y, quienes somos físicos, tenemos además noticia de otras múltiples características maravillosas. La suma de todos nuestros conocimientos sobre los efectos físicos producidos por la luz es muy considerable. Y, sin embargo, carecemos de una noción satisfactoria sobre lo que es.

Hace más de dos siglos, Newton pensaba que la luz era de naturaleza corpuscular; creía que consistía en pequeñas saetas que surcaban el espacio. Otros la consideraban un fenómeno ondulatorio. Al igual que las olas se propagan en el agua, las ondas de luz se propagarían en un medio llamado éter que llenaría el espacio. Siguió una animada controversia entre los partidarios de una y otra postura hasta que, conforme nuevos experimentos fueron revelando sus propiedades, pareció que la teoría ondulatoria daba cuenta de numerosos aspectos ininteligibles para la hipótesis corpuscular.

Pero, con el paso del tiempo, se han descubierto múltiples fenómenos relativos a la interacción entre la luz y la materia que resultan imposibles de entender con la teoría ondulatoria, por lo que han empujado a los científicos a regresar a la concepción de la luz que albergara Newton hace dos siglos. Las observaciones recientes sugieren que los rayos luminosos contienen cantidades de energía que son múltiplos exactos de cierta cantidad mínima (un cuanto de luz), del mismo modo que la materia parece estar constituida por múltiplos enteros de la menor partícula de materia o electricidad (el electrón). Hay por tanto una atomicidad en la luz, al igual que la hay en la materia y en la electricidad.

Pero esta moderna teoría cuántica exhibe una circunstancia muy peculiar, pues la misma entidad a la que la teoría hace referencia queda sumida en la más absoluta oscuridad.

Se presenta así la cuestión sobre la naturaleza física de los cuantos mismos. ¿Miden una yarda, una milla, una pulgada de longitud? ¿O poseen dimensiones infinitesimales? Abundantes hechos experimentales pueden interpretarse como una indicación de que los cuantos miden al menos una yarda, si bien nada cierto puede deducirse de las observaciones pasadas. Las dimensiones espaciales de los cuantos continúan siendo un misterio absoluto.

Hay al menos una manera de medir la longitud de los cuantos que, suponiendo que pudiera llevarse a la práctica, vendría a ser la siguiente: supongamos que dispusiéramos de un obturador que pudiese cortar o franquear el paso de un rayo de luz con tanta rapidez como deseásemos. Tal aparato podría cercenar un haz de luz en segmentos, de modo muy similar a como una sierra para carne rebanaría una salchicha de Bolonia. Queda claro que si las porciones del haz de luz así producidas fueran más cortas que los cuantos de luz, los breves destellos luminosos procedentes del obturador no contendrían sino fracciones de cuanto. A todos los efectos, el aparato cortaría la cabeza o la cola de los cuantos. Pero, para liberar un electrón de una superficie metálica, se requiere un cuanto completo, pues una porción de cuanto carece de la energía necesaria. Así se establecería un límite superior a la longitud del cuanto de luz, sin más que observar los destellos de menor longitud que producen un efecto foto-eléctrico.

No hace falta ser muy ducho en aparejos mecánicos para percatarse de que

ningún obturador mecánico podría operar a tal velocidad. Felizmente, la naturaleza ha conferido a la materia otros atributos, aparte de los puramente mecánicos. Recurriendo a cierta propiedad electroóptica de algunos líquidos, se ha concebido un dispositivo que funciona como un obturador que se abre y se cierra en una diezmilésima de millonésima de segundo, más o menos.

Los breves fogonazos de luz así producidos se dejaron incidir sobre una célula foto-eléctrica y esta respondió a los más breves destellos, los cuales apenas medían unos pies de longitud.

La importancia de este sencillo experimento no puede sobrevalorarse, pues ha demostrado definitivamente que los cuantos de luz miden menos de unos pocos pies de longitud y que, probablemente, solo ocupen diminutas regiones del espacio.

La estructura del núcleo



Por Maria G. Mayer

PUBLICADO EN MARZO DE 1951

PREMIO NOBEL EN 1963

Para el átomo en su totalidad, la física moderna ha desarrollado un fructífero modelo a semejanza de nuestro sistema planetario: consiste en un núcleo central, que correspondería al Sol, y electrones que, cual planetas, giran en torno a él siguiendo ciertas órbitas. Este modelo, aunque deje varias incógnitas, ha resultado muy valioso para explicar gran parte del comportamiento observado en los electrones. El núcleo en sí, empero, no se conoce bien. Ni siquiera la cuestión de cómo se mantienen unidas sus partículas ha recibido cumplida respuesta.

Hace poco, varios físicos, entre quienes se incluye la autora, han sugerido de manera independiente un modelo muy simple para el núcleo. Este se representa en forma de capas, una estructura similar a la del átomo en su conjunto, con los protones y los neutrones agrupados en órbitas, o capas, semejantes a las que ligan a los electrones en el átomo. El modelo explica un número sorprendente de hechos relativos a la composición del núcleo y al comportamiento de sus partículas.

Resulta posible discernir algunos patrones insólitos en las propiedades de ciertas combinaciones de protones y neutrones. Tales patrones son un indicio en favor de nuestro modelo de capas. Una de estas asombrosas coincidencias reside en que las partículas del núcleo, al igual que ocurre con los electrones, prefieren ciertos «números mágicos».

Todo núcleo (excepto el del hidrógeno, que solo consta de un protón) se caracteriza por dos números: el de protones y el de neutrones. La suma de ambos es el peso atómico del núcleo. El número de protones determina la naturaleza del átomo; así, un núcleo con dos protones siempre será helio; uno con tres, litio, y así sucesivamente. Una misma cantidad de protones puede, sin embargo, combinarse con diversos números de neutrones para formar distintos isótopos del mismo elemento. Ahora bien, resulta muy interesante que protones y neutrones prefieran combinaciones en número par: tanto los protones como los neutrones, al igual que los electrones, muestran una fuerte tendencia a emparejarse. En toda la lista de los aproximadamente 1000 isótopos conocidos, no se dan más de seis núcleos estables que contengan un número impar de protones y un número impar de neutrones.

Algunas agregaciones en número par de protones y neutrones se revelan particularmente estables. Uno de tales números mágicos es el 2. El núcleo de helio, con 2 protones y 2 neutrones, constituye uno de los más estables que se conocen. El siguiente número mágico es el 8, que representa al oxígeno, cuyo isótopo más común posee 8 protones y 8 neutrones, amén de una señalada estabilidad. El siguiente número mágico es el 20, el del calcio.

La lista de números mágicos es: 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126. Los núcleos con ese número de protones o neutrones muestran una estabilidad inusual. Resulta tentador suponer que tales números se corresponden con capas cerradas en el núcleo, a semejanza de las capas electrónicas en la parte externa del átomo.

El modelo de capas explica otras características; entre ellas, el fenómeno conocido como isomerismo, o la existencia de estados nucleares excitados de larga vida. Pero quizá la aplicación más importante del modelo sea el estudio de la desintegración beta, en la que un núcleo emite un electrón. El tiempo de vida de un núcleo que puede emitir un electrón depende del cambio de espín que debe sobrevenirle para liberar el electrón. Las teorías actuales de la desintegración beta no gozan de un estado muy satisfactorio y tampoco resulta fácil comprobarlas, ya que solo en algunos casos se conocen los estados de los núcleos radiactivos. El modelo de capas puede aquí servir de ayuda, ya que predice algunos espines en casos que no han sido medidos. Ciertamente, el sencillo modelo aquí descrito no proporciona una descripción completa y exacta de la estructura del núcleo. Con todo, su éxito en la descripción de tantas características indica que no supone una mala aproximación a la verdad.

El antiprotón



Por Emilio Segrè y Clyde E. Wiegand

PUBLICADO EN JUNIO DE 1956

PREMIO NOBEL EN 1959 (SEGRÈ)

Hace un cuarto de siglo, P. A. M. Dirac, de la Universidad de Cambridge, elaboró una ecuación basada en los principios más generales de la relatividad y la mecánica cuántica, la cual describía diversas propiedades del electrón. Solo hubo de introducir en ella la carga y la masa y, con ello, su espín, su momento magnético y su comportamiento en el átomo de hidrógeno se deducían a partir de las matemáticas. Su descubridor halló, sin embargo, que la ecuación requería la existencia de electrones tanto positivos como negativos. Esto es, no solo describía el electrón negativo conocido, sino también una partícula simétrica por completo, idéntica en todo al electrón excepto en su carga, positiva en lugar de negativa.

Pocos años después, Carl D. Anderson, del Instituto de Tecnología de California, encontró electrones positivos (positrones) entre las partículas que los rayos cósmicos producían en una cámara de niebla. Este descubrimiento incitó a los físicos a una nueva y más formidable búsqueda en pos de otra hipotética partícula, una búsqueda que por fin llegó a término hace unos meses.

La ecuación general de Dirac, ligeramente modificada, debería ser tan aplicable al protón como al electrón. Y también en este caso predice la existencia de una antipartícula: un antiprotón, idéntico al protón, pero con carga negativa en vez de positiva.

La cuestión que se planteó entonces fue la de la energía necesaria para crear anti-

protones en un acelerador. Dado que un antiprotón solo puede crearse a la par que un protón, se requiere al menos la energía equivalente a la masa de dos protones: unos dos mil millones de electrón voltios, o dos Bev. Sin embargo, en el experimento propuesto se necesita mucho más. Para convertir la energía en partículas, esta debe concentrarse en un punto. La mejor manera de lograrlo es lanzando una partícula muy energética contra un blanco; es decir, un protón contra otro protón. Tras la colisión, debería haber cuatro partículas: los dos protones originales más el recién creado par protón-antiprotón. Cada uno de ellos saldrá con una energía cinética aproximadamente igual a un Bev, de modo que la generación de un antiprotón requiere dos Bev (para la creación del par protón-antiprotón) más cuatro Bev adicionales (la energía cinética de las cuatro partículas resultantes). El Bevatrón de la Universidad de California se diseñó con estas cifras en mente.

Cuando el Bevatrón comenzó a bombardear un blanco de cobre con protones de seis Bev, el siguiente problema consistió en detectar e identificar los antiprotones creados. Owen Chamberlain, Thomas Ypsilantis y los autores de este artículo concebimos un plan basado en tres propiedades que pueden determinarse con presteza. Primero, la estabilidad de la partícula implicaba que debía sobrevivir el tiempo suficiente para atravesar un largo dispositivo. En segundo lugar, su carga negativa podría identificarse a partir del sentido de la deflexión de la partícula en un campo magnético; la magnitud de su carga se determinaría a partir de la ionización producida en su trayectoria. Y tercero, su masa se calcularía a partir de la curva de su trayectoria en un campo magnético, si se conocía su velocidad.

Cuando el pasado mes de octubre se anunció el descubrimiento del antiprotón, se habían detectado unos sesenta, a una tasa de unos cuatro por cada hora de funcionamiento del Bevatrón. Habían pasado todas las pruebas establecidas. Nos llenó de orgullo el comentario de un compañero al que tenemos gran aprecio y que acababa de terminar un importante y difícil experimento con mesones. Tras examinar una de nuestras pruebas, dijo: «Me hubiera gustado que mis experimentos sobre mesones mu fueran tan convincentes como este». En ese momento, algunas viejas apuestas sobre la existencia del antiprotón comenzaron a saldarse. La más cuantiosa de la que tuvimos noticia fue de 500 dólares. (Nosotros éramos ajenos a ella.)

El bosón de Higgs



Por Martinus J. G. Veltman

PUBLICADO EN ENERO DE 1987

PREMIO NOBEL EN 1999

El bosón de Higgs, así llamado en honor de Peter W. Higgs, de la Universidad de Edimburgo, es el principal ausente del modelo estándar de los procesos elementales, la teoría más aceptada sobre los constituyentes últimos de la materia y las fuerzas fundamentales mediante las cuales interactúan. Según el modelo estándar, toda la materia está formada por quarks y leptones, que interactúan entre sí mediante cuatro fuerzas: la gravedad, el electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerza fuerte. La fuerza fuerte liga los quarks entre sí para formar protones y neutrones; la fuerza fuerte residual mantiene unidos a protones y neutrones en los núcleos. La fuerza electromagnética liga los núcleos y los electrones en los átomos; la fuerza electromagnética residual une los átomos en las moléculas. La fuerza débil es responsable de ciertas clases de desintegración nuclear. La influencia de las fuerzas débil y fuerte solo se deja sentir a distancias cortas; su alcance no supera el radio de un núcleo atómico. La gravedad y el electromagnetismo tienen un alcance ilimitado, por cuya razón nos resultan más familiares.

A pesar de cuanto se ha avanzado en el conocimiento del modelo estándar, hay motivos para pensar que es incompleto. Aquí es donde aparece el bosón de Higgs. Se cree que dicho bosón confiere rigor matemático al modelo, generalizando su aplicación a energías más altas que las conseguidas por la generación actual de aceleradores, pero que podrán alcanzarse pronto en los experimentos futuros. Se supone, además, que el bosón de Higgs genera las masas de todas las partículas fundamentales; podríamos decir que las partículas «se comen» al bosón de Higgs para ganar peso.

El mayor problema de dicha partícula es que hasta ahora no se ha hallado ninguna prueba de su existencia. Sí contamos, en cambio, con bastantes indicaciones indirectas que sugieren que la partícula no existe. Lo cierto es que la física teórica está constantemente llenando el vacío con tantos fantasmas del tenor del bosón de Higgs que parece imposible que alguien pueda ver siquiera las estrellas en una noche clara. Aunque puede que los futuros aceleradores lleguen a encontrar una prueba directa del bosón de Higgs y demuestren que los motivos para postular su existencia eran correctos, pienso que las cosas no serán tan sencillas. Debo aclarar de inmediato que esto no significa que todo el modelo estándar esté equivocado, sino que este probablemente sea solo una aproximación —aunque muy buena— de la realidad.

Las fuerzas entre partículas elementales son estudiadas en los laboratorios de física de altas energías mediante experimentos de colisión. Analizando el diagrama de dispersión de las partículas incidentes, se puede obtener algún conocimiento de las fuerzas.

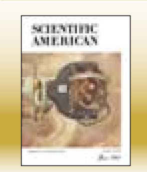
La teoría electrodébil predice con éxito los efectos de las colisiones entre electrones y protones. También predice con éxito las interacciones de los electrones con los fotones, con los bosones *W* y con otras partículas llamadas neutrinos. Sin embargo, la teoría comienza a tambalearse en cuanto intenta predecir las interacciones de los bosones *W* entre sí: a energías suficientemente elevadas, la probabilidad de colisión de un bosón *W* con otro sería mayor que 1. Resultado que no tiene ningún sentido, pues sería como decir que, aunque un tirador apuntase en dirección opuesta a la diana, conseguiría un blanco perfecto.

Pero aquí aparece el bosón de Higgs como remedio salvador. El bosón de Higgs se acopla con los bosones *W* de suerte tal que la probabilidad de colisión cae dentro de los límites admisibles, entre 0 y 1. En otras palabras, la incorporación del bosón de Higgs en la teoría electrodébil «elimina» el mal comportamiento.

Armados con el argumento de que el bosón de Higgs es necesario para renormalizar la teoría electrodébil, es fácil inferir cómo proceder en su búsqueda: los bosones vectoriales débiles deben colisionar entre sí a energías extremadamente altas, a un billón de electronvoltios (TeV) o más. Las energías necesarias se podrían alcanzar con el propuesto Supercolisionador Superconductor (SSC) de 20 TeV, cuya construcción está todavía sujeta a estudio en EE.UU. Si la distribución de partículas dispersadas sigue las predicciones de la teoría electrodébil renormalizada, habrá una fuerza compensatoria, de la que el bosón de Higgs sería el candidato obvio. Si la distribución no sigue la predicción, entonces lo más probable es que los bosones vectoriales débiles interaccionen a través de una fuerza fuerte, con lo que se abriría una nueva área de la física.

TECNOLOGÍA

Máseres ópticos



Por Arthur L. Schawlow

PUBLICADO EN JUNIO DE 1961

PREMIO NOBEL EN 1981

Durante al menos medio siglo, los ingenieros de comunicaciones han soñado con poseer un dispositivo que genere ondas luminosas con la misma eficiencia y precisión que puede lograrse para las ondas de radio. El contraste entre la pureza de las ondas electromagnéticas radiadas por una lámpara incandescente y las emitidas por un generador de ondas de radio a duras penas podría ser mayor. Las ondas de radio de un oscilador electromagnético están confinadas a una región muy angosta del espectro electromagnético. Son tan impolutas que pueden usarse para transportar señales. En comparación, las fuentes de luz tradicionales son generadores de ruido que no sirven sino para los más crudos propósitos de transmisión. Hasta el último año, con la invención del máser óptico, no se había conseguido un control preciso de la generación de ondas luminosas.

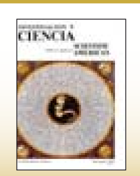
Aunque los máseres ópticos son aún muy recientes, ya han producido haces luminosos de enorme intensidad y con una direccionalidad muy marcada. Estos haces resultan mucho más monocromáticos que los de otras fuentes luminosas.

El máser óptico pertenece a una clase de fuente luminosa tan novedosa que resulta arduo aventurar sus posibles aplicaciones. La transmisión de mensajes, desde luego, constituye su uso más obvio y el que se está considerando con mayor atención desde un punto de vista técnico. Enviar señales luminosas, aunque se haya hecho desde los albores de los tiempos, adolece de un límite impuesto por la languidez y el ruido de las fuentes disponibles. Un rayo de luz ordinario podría compararse a una onda portadora lisa y pura, modulada con ruido por breves destellos de luz aleatorios emitidos por los átomos de la fuente. El máser, por el contrario, proporciona una onda de tersura casi ideal, que no lleva sino lo que se coloque sobre ella.

Si lográramos encontrar métodos de modulación adecuados, las ondas de luz coherentes podrían transportar enormes cantidades de información. Ello se debe a que la frecuencia de la luz es tan elevada

que, incluso en una banda estrecha del espectro visible, comprende un número enorme de ciclos por segundo; la cantidad de información que puede transmitirse es directamente proporcional al número de ciclos por segundo y, por tanto, al ancho de banda. En la transmisión televisiva, la onda portadora lleva una señal que equivale a un ancho de banda efectivo de cuatro megaciclos. Un solo haz máser podría transmitir cómodamente una señal con una frecuencia, o ancho de banda, de 100.000 megaciclos, suponiendo que pudiera hallarse la manera de generar una señal así. Esta podría contener tanta información como la de todos los canales de radiocomunicación existentes. Debe admitirse que no hay rayo luminoso que penetre la niebla, la lluvia o la nieve con facilidad. Por tanto, para que resulten de utilidad en las comunicaciones, los rayos luminosos deberán canalizarse.

Defensa espacial y misiles balísticos



Por Hans A. Bethe, Richard L. Garwin, Kurt Gottfried y Henry W. Kendall

PUBLICADO EN DICIEMBRE DE 1984

PREMIO NOBEL EN 1967 (BETHE) Y 1990 (KENDALL)

En una alocución televisada en 1983 en la que llamaba a la comunidad científica del país a «convertir las armas nucleares en artefactos inocuos y obsoletos», el presidente [Ronald Reagan] expresaba la esperanza de que una revolución tecnológica permitiera a EE.UU. «interceptar y destruir los misiles balísticos estratégicos antes de que alcancen nuestro suelo o el de nuestros aliados».

¿Puede un sistema de defensa contra misiles balísticos despejar la amenaza de aniquilación nuclear?

Nuestro análisis de las perspectivas de un sistema defensivo espacial contra el ataque de misiles balísticos se centrará en el problema de la interceptación en fase de lanzamiento.

La capa defensiva requerirá componentes que no constituyan armamento propiamente dicho. Se trataría de alertar del ataque mediante la detección de las estelas de los cohetes impulsores; comprobar el número exacto de misiles atacantes y, a ser posible, su identidad; determinar la trayectoria de los misiles y su posición; asignar, apuntar y disparar las armas defensivas; llevar a cabo una evaluación del éxito o fracaso de la interceptación y, si el tiempo lo permite, disparar ulteriores andanadas.

Los cohetes impulsores escapan a cualquier posibilidad de detección desde la superficie terrestre accesible a la defensa; por tanto, el sistema tendría que comenzar la interceptación desde el espacio. En este orden, se está investigando con dos tipos de armas de «energía dirigida»: una basada en el uso de rayos láser, que viajan a la velocidad de la luz (300.000 kilómetros por segundo), y otra de haces de partículas, que se desplazan a una velocidad cercana a la anterior. También se ha pensado en proyectiles no explosivos que alcancen la señal infrarroja de los cohetes.

Otros planes de interceptación contemplan el uso de armas de láseres químicos, haces de partículas neutras y vehículos no explosivos de aproximación, todos los cuales habrían de estacionarse en órbitas bajas.

El rayo láser más brillante diseñado hasta hoy es un haz infrarrojo producido por un láser químico de fluorhídrico. El Departamento de Defensa de EE.UU. tiene prevista una demostración de una versión de dos megavatios para 1987. Suponiendo que la construcción de láseres de fluorhídrico de 25 megavatios y de espejos de 10 metros ópticamente perfectos fuese posible, dispondríamos de un arma con un «radio mortal» de 3000 kilómetros. En ausencia de contramedidas y en el caso de un funcionamiento impecable de todos los componentes, bastarían 300 láseres de ese tipo para destruir, desde órbitas bajas, 1400 misiles intercontinentales.

Un arma de haces de partículas podría disparar partículas cargadas muy energéticas, las cuales penetrarían en el misil y dañarían los semiconductores de su sistema de guía. Sin embargo, esos haces se desvían por influencia del campo magnético de la Tierra, por lo que resultaría difícil acertar con ellos objetivos distantes. Cualquier arma de haces de partículas, por tanto, habría de servirse de un rayo neutro. Además, con semiconductores de arseniuro de galio, mil veces más resistentes a las radiaciones que los de silicio, sería posible proteger al sistema de guía frente a semejante arma.

La medición exacta del tiempo



Por Wayne M. Itano y Norman F. Ramsey

PUBLIBLICADO EN SEPTIEMBRE DE 1993

PREMIO NOBEL EN 1989 (RAMSEY)

Las nuevas técnicas basadas en el confinamiento y enfriamiento de átomos e iones nos dan una buena razón para pensar que los futuros relojes serán mil veces más precisos que los actuales.

Cabe esperar muy buenos resultados del método que se basa en la frecuencia de resonancia de iones confinados. Estos pueden ser suspendidos en un vacío, de modo que queden casi perfectamente aislados de toda influencia perturbadora y, por tanto, no sufran colisiones con otras partículas o con las paredes de la cámara.

Se usan trampas de dos clases. En la de Penning, una combinación de campos eléctricos estáticos no uniformes y campos magnéticos estáticos uniformes atrapa los iones. En la de radiofrecuencia (a menudo llamada trampa de Paul), es un campo eléctrico oscilante no uniforme el que lo hace. En Hewlett-Packard y en el Laboratorio de Propulsión a Chorro, entre otros lugares, se han fabricado dispositivos experimentales por medio de trampas de Paul. Las partículas aprisionadas eran iones de mercurio 199. El Q máximo [una medida de la energía absorbida y las pérdidas] de los patrones de iones confinados sobrepasa 10^{12}. Este valor es 10.000 veces mayor que el de los relojes de haz de cesio actuales [a mayor Q, mayor estabilidad del reloj].

En los últimos años se ha progresado espectacularmente en el encierro y enfriamiento de átomos neutros, más difícil que el de iones. Se obtiene un excelente enfriamiento con tres pares de láseres dirigidos en sentidos opuestos a lo largo de tres direcciones mutuamente perpendiculares. De esta manera todo átomo resulta frenado, cualquiera que sea la dirección en que se mueva. Este sistema recibe el nombre de «melaza óptica». Las trampas de átomos neutros almacenan densidades mayores que las de iones, ya que estos últimos tienden a repelerse. A igualdad de los demás factores, un mayor número de átomos proporciona una razón más elevada entre señal y ruido.

Hay por tanto una atomicidad en la luz, al igual que en la materia —ERNEST O. LAWRENCE Y J. W. BEAMS, 1928

El principal obstáculo para usar átomos neutros como patrones de frecuencia es que los campos láser alteran mucho las resonancias de los átomos en la trampa. Un dispositivo, el «surtidor atómico», permite superar esta dificultad. Las trampas capturan y enfrían un grupo de átomos. A estos se les aplica un impulso hacia arriba, de manera que se sitúen en una región libre de luz láser, pero los átomos vuelven a caer por efecto de la gravedad. Al subir y bajar, atraviesan un campo oscilante. Se inducen así transiciones de resonancia tal y como se hace en el aparato de haz de campos oscilatorios separados.

Buena parte de la investigación actual se centra en iones enfriados por láser en trampas que resuenan en el dominio óptico, con frecuencias de miles de gigahercios. Estos patrones disfrutan de un Q muy elevado; podrían, pues, ser la base de relojes muy exactos. Los investigadores del NIST han observado un Q de 10^{13} en la resonancia ultravioleta de un ion individualmente atrapado y enfriado por láser. Es el mayor Q jamás observado en una resonancia atómica, sea óptica o en microondas.

Las mejoras previstas aumentarán la eficacia de las aplicaciones actuales y abrirán el camino a otras nuevas. Cuáles sean estas, solo el tiempo podrá decirlo.

Grafeno

Por Andre K. Geim y Philip Kim

PUBLICADO EN JUNIO DE 2008

PREMIO NOBEL EN 2010 (GEIM)

Cada vez que alguien escribe con un lápiz sobre un papel, el trazo incluye diminutas porciones del material más en boga hoy en física y nanotecnia: el grafeno. El grafito, el material de las minas de los lápices, es un tipo de carbono puro constituido por láminas apiladas. «Grafeno» es el nombre de una sola lámina: un plano de un único átomo de espesor en el que los átomos se disponen en una red hexagonal. No solo es el material más delgado posible; es además sumamente fuerte y rígido. En estado puro, conduce los electrones a temperatura ambiente mejor que cualquier otra sustancia. Actualmente, los laboratorios de todo el mundo lo investigan a fondo para determinar si podrían construirse con él pantallas inteligentes, transistores ultrarrápidos y hasta computadores de puntos cuánticos.

Entre tanto, la peculiar naturaleza del grafeno a escala atómica permite adentrarse en fenómenos que solo puede describir la física cuántica relativista. Su investigación hasta ahora ha sido patrimonio exclusivo de los astrofísicos y de los físicos de altas energías, que trabajan con telescopios o aceleradores de millones o miles de millones de euros. El grafeno permite poner a prueba las predicciones de la mecánica cuántica relativista con instrumental de mesa de laboratorio.

El grafeno posee dos propiedades que le confieren un carácter excepcional. La primera de ellas es su elevada calidad, a pesar de su tosca fabricación. Esa calidad resulta de su pureza en carbono combinada con la regularidad del retículo en el que se disponen sus átomos. Hasta ahora, no ha podido encontrarse un solo defecto atómico en el grafeno, sea una posición atómica vacante en el retículo o un átomo fuera de lugar. Un orden cristalino tan perfecto parece derivarse de unos enlaces interatómicos de enorme solidez, aunque muy flexibles. Se crea así una sustancia más dura que el diamante, pero cuyos planos pueden curvarse cuando se les aplica un esfuerzo mecánico. La calidad del retículo cristalino determina también la conductividad eléctrica, notablemente alta, del grafeno. Los electrones se desplazan por el material sin ser desviados de su curso por imperfecciones del retículo ni por átomos extraños.

La segunda propiedad excepcional del grafeno estriba en sus electrones de conducción, los cuales se desplazan mucho más deprisa y como si su masa fuese mucho menor que la de los electrones que circulan por los metales y semiconductores ordinarios. Los electrones del grafeno —tal vez deberían llamarse «portadores de carga eléctrica»— son unos entes curiosos, que habitan un extraño mundo donde imperan leyes análogas a las de la mecánica cuántica relativista. Por lo que sabemos, este tipo de interacción en el interior de un sólido es exclusivo del grafeno. Gracias a tan novedoso material, la mecánica cuántica relativista no queda reservada a la cosmología o a la física de altas energías; ahora pertenece también al laboratorio.

Un campo de la ingeniería merece especial mención: la electrónica basada en el grafeno. Se ha hecho hincapié en que los portadores de carga se desplazan por el grafeno a gran velocidad, con escasas pérdidas de energía por dispersión o colisiones con los átomos del retículo. Esta propiedad debería permitir la creación de transistores balísticos, dispositivos de frecuencia ultraelevada que responderían con mucha mayor rapidez que los transistores actuales.

Aún es más tentadora la posibilidad de que el grafeno venga en ayuda de la industria microelectrónica para prolongar la vigencia de la ley de Moore. La notable estabilidad y conductividad eléctrica del grafeno, incluso a escala nanométrica, permitiría fabricar transistores de menos de 10 nanómetros y quizá de la pequeñez de un anillo bencénico. A largo plazo, es posible imaginar circuitos integrados grabados en una sola lámina de grafeno.

Cualquiera que sea el futuro, es casi seguro que el maravilloso país de un solo átomo de grosor se mantendrá en el candelero durante las próximas décadas. Los ingenieros seguirán trabajando para llevar al mercado innovadores productos y los físicos continuarán ensayando exóticas propiedades cuánticas. Pero lo que de verdad asombra es que toda esta riqueza y complejidad haya estado durante siglos oculta en una sencilla marca de lápiz.

PARA SABER MÁS

Agujeros negros y tiempo curvo: El escandaloso legado de Einstein. Kip S. Thorne. Editorial Crítica, 1995.

The strangest man: The hidden life of Paul Dirac, mystic of the atom. Graham Farmelo. Basic Books, 2009.

From eternity to here: The quest for the ultimate theory of time. Sean Carroll. Dutton Books, 2010.

Massive: The missing particle that sparked the greatest hunt in science. Ian Sample. Basic Books, 2010.

por Luis Cardona y Manuel Elices

Comensalismo

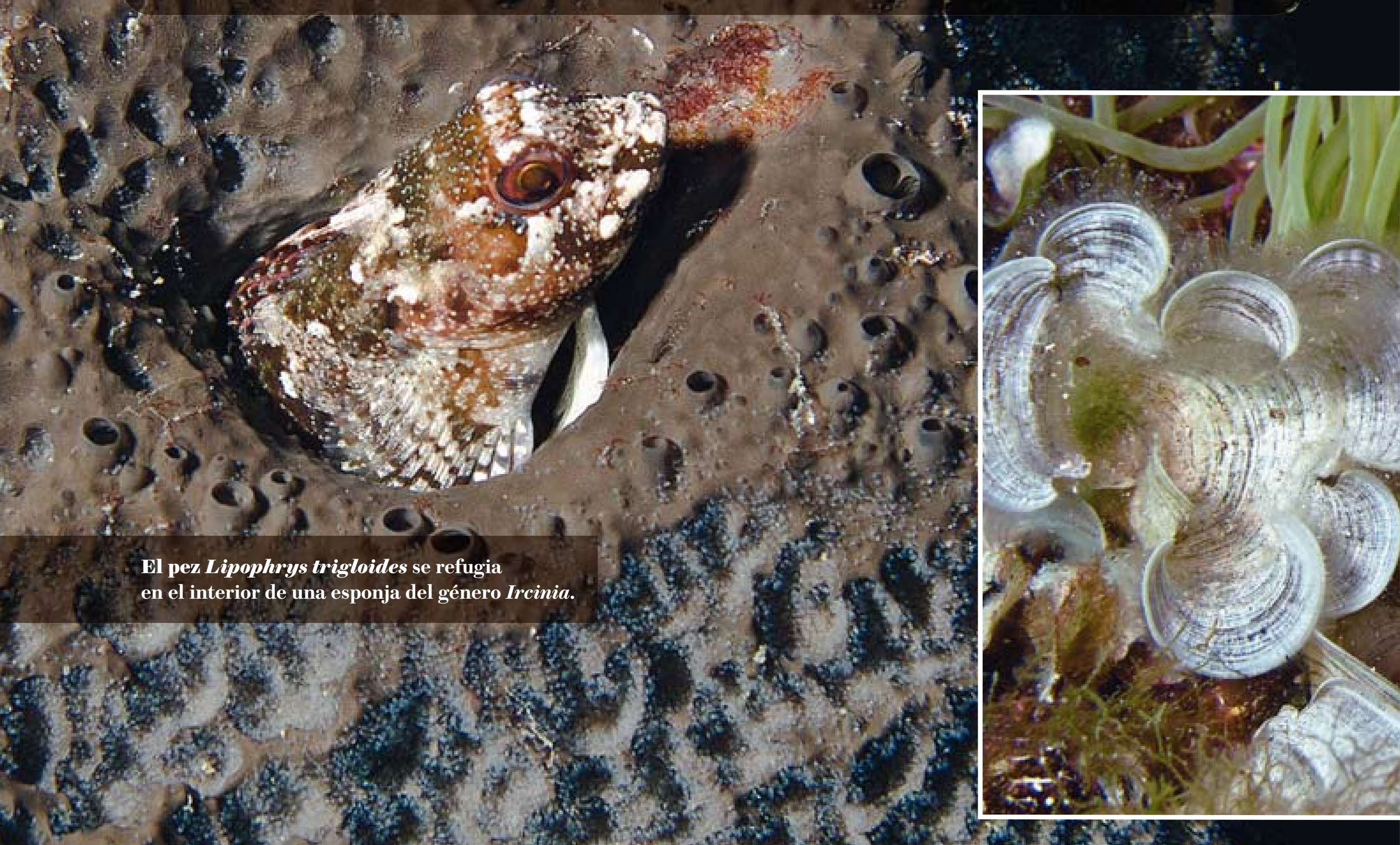
En el Mediterráneo observamos varios ejemplos de esa relación peculiar que se establece entre algunas especies

Al pensar en las interacciones entre especies de un mismo ecosistema, solemos centrarnos en la competencia y la depredación, sin lugar a dudas por su dramatismo y fuerte carga simbólica. El parasitismo, la simbiosis y el mutualismo también acaparan una parte importante de nuestro interés científico debido a los delicados equilibrios que se establecen entre las especies implicadas. En cambio, el comensalismo atrae menos la atención, aunque constituye una estrategia fundamental para quienes la practican. De las dos especies que se asocian, el comensal saca un provecho, mientras que el huésped no, aunque tampoco se ve perjudicado.

De todos es conocida la relevancia de los corales formadores de arrecifes a la hora de incrementar la complejidad estructural del ecosistema. Menos conocida es la importancia de las esponjas como refugio habitual de crustáceos, poliquetos, sipuncúlidos y otros invertebrados. Y aunque en el Mediterráneo no resulta habitual que los peces se cobijen en ellas, en ocasiones nos encontramos con algunos ejemplos de tal estrategia, como cuando *Lipophrys trigloides* se asienta en el interior de una esponja del género *Ircinia*.

Anémonas y medusas ofrecen también refugio seguro a los que se atreven a ocultarse entre sus tentáculos sin provocar el disparo de las células urticantes. En el Mediterráneo, el pequeño gobido *Gobius bucchichi* suele aparecer asociado a la ortiga de mar (*Anemonia sulcata*), mientras que las poslarvas de las diferentes especies de jureles (*Trachurus* spp.) hacen lo propio con la medusa *Cotylorhiza tuberculata*. A diferencia de los peces payaso del Indopacífico, que sobreviven solo en las cercanías de una anémona, las especies mediterráneas antes citadas no las necesitan. En realidad, *Gobius bucchichi* puede cobijarse bajo cualquier piedra y las poslarvas de jurel se asocian a cualquier objeto flotante, vivo o inanimado. Sin embargo, cuando existen cnidarios disponibles, no dudan en aprovecharlos. Sería interesante determinar si la relación con un ser vivo mejora en realidad su supervivencia.

Pero el caso más intrigante de comensalismo entre las especies marinas mediterráneas lo ofrecen la morena (*Muraena helena*) y un pequeño camarón, *Lysmata seticaudata*. Como si se tratara de los pluviales limpiadores de cocodrilos descritos por Heródoto hace más de dos mil años, los camarones se aproximan a las morenas y buscan entre sus dientes partículas de alimento. Ignoramos la relevancia de esta limpieza bucal para las morenas, pero muy hambrientos deben hallarse los camarones para aventurarse a buscar alimento en semejante lugar.



El pez *Lipophrys trigloides* se refugia en el interior de una esponja del género *Ircinia*.



FOTOGRAFÍAS DE MANUEL ELICES

El pequeño camarón de la especie *Lysmata seticaudata* se nutre de los restos alimentarios que halla entre los dientes de la morena (*Muraena helena*).

Las poslarvas de diferentes especies de jureles (*Trachurus* spp.) viven en la proximidad de la medusa *Cotylorhiza tuberculata*.

El góbido *Gobius bucchichi* aparece asociado a la ortiga de mar (*Anemonia sulcata*).





por Alfredo Marcos

Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.



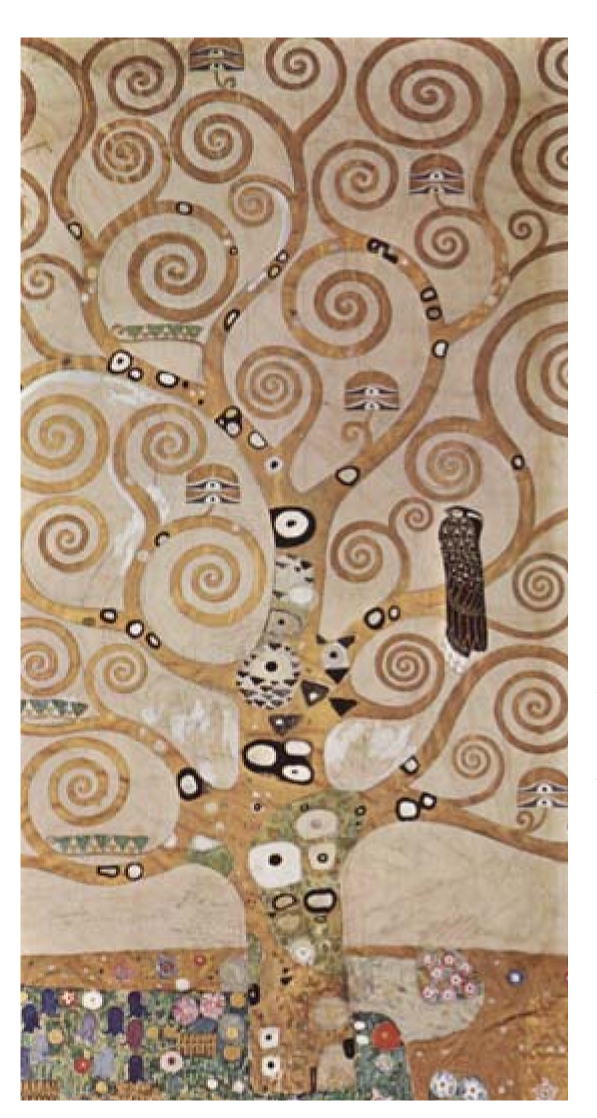
Metáforas de la vida y vida de las metáforas

La presencia de metáforas en biología es compatible con el realismo científico

Negación, negociación, aceptación. Como un paciente al cual se le comunica un mal diagnóstico, así ha reaccionado la filosofía de la ciencia ante la metáfora. Ha pasado por varias fases típicas. En primer lugar, los filósofos de la ciencia se han negado a ver las metáforas: no puede ser, la ciencia es el territorio del lenguaje literal, las metáforas quedan siempre allende sus fronteras, en los dominios brumosos de la belleza literaria o del sinsentido metafísico. El filósofo alemán Hans Reichenbach afirmaba en 1938 que el neopositivismo aboga por «el estricto repudio del lenguaje metafórico de la metafísica».

Pero el sol no se puede tapar con la mano, del mismo modo que no puede ocultarse la presencia de metáforas en los textos científicos. Negociemos, pues. Que pase la metáfora, pero solo hasta el zaguán. Otorguemos a las metáforas ciertas funciones periféricas, alejadas del núcleo central de la ciencia. Puede que hasta resulten serviciales para las tareas heurísticas, didácticas y divulgativas. Pueden guiarnos en el comienzo de una investigación, tal vez resulten inspiradoras, pueden favorecer la conexión inesperada entre ideas diferentes, quizás incluso orientarnos o mostrarnos el inicio del camino. También tienen su utilidad en el aula o en la prensa. Un buen juego de metáforas hará más fácil la explicación de los conceptos más abstractos. Pero el investigador que emprende la búsqueda valiéndose de una metáfora tendrá, a la postre, que desprenderse de ella para regresar al lenguaje literal de la ciencia seria. Y otro tanto le sucede al estudiante o al lego que se internan en una laberíntica teoría con la metáfora como lazarillo: ambos tendrán que deshacerse de su guía cuando por fin entiendan.

Ya en los años sesenta del pasado siglo, algunos filósofos de la ciencia, como la británica Mary Hess y el neozelandés Rom Harré, demostraron que la visión positivista del lenguaje científico, que lo considera exclusivamente literal, no hace justicia a la ciencia real. Metáforas, comparaciones, analogías y modelos son recursos comunicativos y útiles heurísticos imprescindibles. ¡Y eso ya es muy importante! Pero es que, además, residen en la entraña misma de las teorías científicas y no pueden ser simplemente remplazados por lenguaje literal. Hay que aceptarlo.



DETALLE DE *EL ÁRBOL DE LA VIDA*, DE GUSTAV KLIMT, WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

Podemos encontrar metáforas en todas las disciplinas científicas. No obstante, en lo que sigue, nos centraremos en algunas de las que aparecen en las ciencias de la vida. Ya Aristóteles, considerado el padre de la biología, en su *Retórica* dejó dicho que la metáfora es «más que nada, lo que da claridad». Y en su tratado sobre la *Poética* escribió que «lo más importante con mucho es dominar la metáfora [...], es indicio de talento».

De hecho, la biología de Aristóteles está escrita a base de metáforas. Hallaríamos ejemplos de ello en casi cualquier página de los tratados *Historia animalium*, *De partibus aminalium* o *De generatione animalium*: los vasos sanguíneos y el corazón se comparan con jarrones; el fluir de la sangre en los vasos, con el del agua a través de canales de riego; el vientre, con un pesebre de donde el cuerpo entero toma la comida; la región del corazón, donde se halla el calor vital, con el fuego del hogar. El propio concepto de *pepsis*, clave en la concepción térmica de la fisiología, es metafórico: significa tanto maduración como digestión o cocción. Con frecuencia utiliza elementos

de la actividad cotidiana, sobre todo relacionados con la pesca y la navegación, que sin duda resultaban familiares a cualquier griego: las patas de los cuadrúpedos le parecen los soportes de los barcos en dique seco; equipara las patas traseras de los saltamontes a timones de barca, y la cola de la langosta a un remo; la trompa del elefante al tubo que se utiliza para respirar bajo el agua; el cuello y pico de las aves zancudas a una caña de pescar con su línea y anzuelo. Todas estas imágenes sirven para entender la *función* de un determinado tejido, órgano o miembro, e intentan explicar la misma por relación con objetos artificiales cuya función nos resulta evidente.

También en la biología contemporánea podemos encontrar numerosos ejemplos de metáforas. En el libro *La evolución y sus metáforas*, del paleontólogo catalán Jordi Agustí, leemos: «Como en otras actividades del conocimiento, las ciencias suelen valerse en su desarrollo de esquemas conceptuales preconcebidos —a los que podemos dar el nombre de metáforas— y que, como los antiguos mitos, perduran sin ser cuestionados durante generaciones; "eternas metáforas", al decir de S. J. Gould». Según Agustí, en fecha reciente se han puesto en duda «muchas de las metáforas utilizadas en la biología evolutiva en el último medio siglo, todas ellas basadas en el papel omnímodo de la selección natural y en una concepción gradualista del cambio evolutivo». Es decir, la propia teoría de la evolución, que constituye la médula de la biología actual, parece sustentarse sobre metáforas.

En efecto, no faltan metáforas en la obra de Charles Darwin. «Maestro de la metáfora», le llama Stephen Jay Gould. «Todos conocemos —afirma Gould— las dos metáforas que Darwin empleó para definir su teoría: la selección natural y la lucha por la existencia. También podríamos considerar metáforas las tres descripciones principales que Darwin hizo de la naturaleza, a cual más maravillosa, adecuada y poética». Se refiere Gould a la visión que propone Darwin de la naturaleza como un *ribazo enmarañado*, en alusión a su complejidad y a lo intrincado de las relaciones ecológicas. En segundo término, apunta a la comparación de la naturaleza con un árbol, *el árbol de la vida*, metáfora de origen bíblico con la que Darwin pretende expresar la interconexión genealógica entre todos los seres vivos. En tercer lugar, alude a la naturaleza como *ser de dos caras*, una luminosa y otra oscura, pues junto con el equilibrio y armonía de la vida, se dan sórdidas luchas y sufrimiento.

Podríamos incluso decir que la biología actual se halla profundamente marcada por ciertas metáforas. Algunas de ellas, como la del gen egoísta, debida al zoólogo Richard Dawkins, y que nos fuerza a ver el organismo como un simple vehículo de sus genes, han condicionado durante décadas el desarrollo de las ciencias de la vida. En la actual era posgenómica algunos autores abogan precisamente por un cambio de metáforas. Es el caso del cardiólogo británico Denis Noble, quien sugiere que miremos los genes como elementos cautivos en el organismo, y no como rectores de todos sus procesos y acciones.

La metáfora no es una enfermedad de la ciencia. Es la fuerza creativa que le da vitalidad

Aceptemos, pues, la presencia e importancia de las metáforas en la ciencia y, especialmente, en las ciencias de la vida. Ello no indica que la biología esté libre de todo compromiso con la verdad. Sucede, más bien, que las metáforas pueden ser verdaderas o falsas, no solo bellas, elegantes, clarificadoras o sus contrarios. Es más, quizá son bellas en la medida en que son veraces. Además, cada metáfora tiene su propia *inercia heurística*, y el científico se ve obligado a perseguir a sus metáforas hasta donde estas le lleven, para comprobar la verdad de las mismas o para modificarlas, mientras que el poeta no necesita comprometerse con todas las consecuencias de sus metáforas.

Algunos filósofos de la ciencia, como el holandés Bas van Fraassen, sostienen que la presencia de metáforas en la ciencia sería incompatible con una interpretación realista de la misma. Para el norteamericano Frederick Suppe, en cambio, el lenguaje científico no es literal, pero la verdad sí constituye un objetivo para la ciencia. ¿Cómo podemos compatibilizar metáfora y realismo?

Planteemos el problema con la crudeza y lucidez con que lo hace Friedrich Nietzsche en su obra *Sobre verdad y mentira en sentido extramoral*: «Aquel a quien envuelve el hálito de la frialdad, se resiste a creer que el concepto [...] no sea más que el residuo de una metáfora». Eso son los conceptos científicos, no lenguaje literal, sino residuos metafóricos, metáforas que han llegado a convertirse en convenciones. Según el pensador alemán, nos engañamos cuando olvidamos el origen de nuestros conceptos. Creemos que proceden de la experiencia y del razonamiento lógico. Nacen, sin embargo, de la fantasía. Nacen como metáforas. Y «solamente mediante el olvido puede el hombre alguna vez llegar a imaginarse que está en posesión de una "verdad". [...] Olvida que las metáforas [...] no son más que metáforas y las toma por las cosas mismas».

Como sostiene el filósofo francés Paul Ricoeur, cada metáfora tiene su propia vida. La ciencia está cargada de metáforas vivas. Metáforas nacientes, como conjeturas o hipótesis, metáforas maduras, como teorías, y metáforas ya fijadas, casi inertes, convertidas en pura convención o paradigma. Solo el olvido de su origen metafórico, afirma Nietzsche, nos permite atribuir *verdad* a los conceptos y teorías convencionales de la ciencia.

Según esa visión de las cosas, la aceptación de la metáfora en ciencia implica la renuncia a una interpretación realista. Pero, precisamente, el olvido puede fungir aquí como síntoma de verdad: olvidamos con mayor facilidad el origen metafórico de los conceptos y teorías que mejor funcionan, que generan buenas aplicaciones y predicciones correctas, que conservan su coherencia interna. Todo esto no es garantía de verdad, lo sabemos, pero ¿no estamos acaso ante los síntomas de la verdad? La metáfora, en definitiva, no es una enfermedad de la ciencia. Es la fuerza creativa que le da vitalidad, y quizá también el mejor vehículo para aproximarse a la realidad de las cosas.

PARA SABER MÁS

Lenguaje y vida: Metáforas de la biología en el siglo XX. Evelyn Fox Keller. Ediciones Manantial, 2000.
La metáfora viva. Paul Ricoeur. Trotta, 2001.
Making truth: Metaphor in science. Theodore L. Brown. University of Illinois Press, 2003.
Metaphor and analogy in science education. Peter Aubusson, Allan G. Harrison y Steve Ritchie (eds.). Springer, 2006.
Ciencia y acción. Alfredo Marcos. F. C. E., 2010, capítulo 10.

por Enrique Velo

Enrique Velo, especialista en energía de la biomasa, es coordinador del Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano de la Universidad Politécnica de Cataluña.



Pobreza energética

Más que los obstáculos técnicos, lo que impide el acceso energético en África es la falta de planificación, capacidades y coordinación entre instituciones

Una quinta parte de la población mundial sufre pobreza energética. En el África subsahariana, la región del planeta con menores índices de acceso a servicios energéticos, dos de cada tres hogares carecen de suministro eléctrico. El ochenta por ciento de los habitantes utilizan combustibles tradicionales (leña o carbón) para cocinar y, en algunos casos, para la calefacción, a costa de su salud: 1,4 millones de personas mueren cada año a causa de la inhalación de humos y partículas en su hogar, muchas más que las registradas por malaria.

Esa falta de acceso a la energía puede parecer un problema eminentemente técnico, de falta de infraestructuras. Pero las consecuencias son muy humanas; recaen sobre todo en mujeres y niños, que son quienes pasan más tiempo dentro de casa y también los responsables de la recolección del combustible (así como del agua). En realidad, toda actividad en el día a día se ve afectada por la falta de energía; por ende, se ven reducidas las oportunidades de progreso y desarrollo de las personas. En palabras del secretario general de la ONU, Ban Ki-Moon, «la energía transforma vidas, negocios y economías».

Cada vez más organizaciones se unen para luchar contra esta situación de pobreza energética. La ONU ha declarado el 2012 Año Internacional de la Energía Sostenible para Todos. Es, por tanto, momento de generar conciencia, analizar los factores que condicionan el éxito o el fracaso de las acciones llevadas a cabo hasta la fecha y, sobre todo, de adoptar mecanismos concretos para aumentar el acceso a la energía sostenible. Las lecciones aprendidas en la última década indican que no existen barreras técnicas fundamentales, sino falta de planificación a largo plazo y coordinación interinstitucional. El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo destaca tres objetivos prioritarios que requieren la creación de mecanismos y capacidades: fortalecimiento de las políticas nacionales y los marcos institucionales; movilización y ampliación de las opciones de financiación; y desarrollo de métodos que permitan ampliar la prestación del servicio de energía a nivel local.

En el contexto de la electrificación es, por tanto, primordial que todo proyecto, además de introducir infraestructuras para proveer iluminación y comunicación, y dotar de recursos para el desarrollo de actividades productivas y comunitarias, integre un enfoque de gestión y sostenibilidad que garantice la operatividad y la continuidad del servicio eléctrico a largo plazo. Esto es, los servicios energéticos modernos deben resultar económicamente asequibles, técnicamente fiables, no contaminantes y aceptados socialmente por la comunidad.

Tendido eléctrico sin conectar en una comunidad rural africana. Se instalaron las líneas de media tensión antes de las elecciones; las de baja tensión nunca llegaron.

Para ello, contamos con las tecnologías de aprovechamiento de las energías renovables, como las pequeñas centrales hidroeléctricas, los módulos fotovoltaicos o las turbinas eólicas, soluciones plenamente maduras, fiables y competitivas frente a la extensión de red.

Desde el Instituto de Sostenibilidad y el Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) trabajamos en el proyecto «Energía para todos 2030», cuyo objetivo es incrementar el apoyo público y político que haga posible el aumento de la ayuda que destina la Unión Europea al acceso a la energía en el África subsahariana. La financiación proviene de la Comisión Europea y el Centro de Cooperación para el Desarrollo de la UPC. A lo largo de los últimos dos años, hemos asesorado a diputados del Parlamento europeo y del español para la adopción de resoluciones a favor del acceso a la energía, además de generar y divulgar numerosos trabajos científicos sobre este campo. Entre otros proyectos, se ha desarrollado una planta piloto de generación eléctrica a partir de biomasa (residuos agroforestales). Asimismo, se ha ahondado en los vínculos entre salud y energía: a partir de las consecuencias que tiene sobre la salud la falta de energía en cada una de las actividades diarias de una familia subsahariana, se han planteado y valorado económicamente soluciones técnicas concretas.

Mediante esos avances y recomendaciones, contribuimos a la toma de decisiones por parte de usuarios, profesionales y responsables políticos, e invitamos a la ciudadanía europea y africana a apoyar la acción conjunta frente al enorme desafío de proveer energía de forma sostenible para toda la población.

POL ARRANZ-PIERA

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing

MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

FÍSICA CUÁNTICA

ÁRBOLES, BUCLES Y NUEVA FÍSICA

Puede que la unificación de las interacciones de la naturaleza resulte más sencilla de lo que imaginábamos

Zvi Bern, Lance J. Dixon y David A. Kosower



KENN BROWN Y CHRIS WREN, MONDOLITHIC STUDIOS



Zvi Bern es profesor de física en la Universidad de California en Los Ángeles, **Lance J. Dixon** investiga en el Acelerador Lineal de Stanford y **David A. Kosower** trabaja en el Instituto de Física Teórica que la Comisión para la Energía Atómica francesa tiene en Saclay. Los autores han destacado por sus aportaciones al estudio de la teoría cuántica de campos y por el desarrollo del método unitario para el cálculo de amplitudes.



En un día soleado de primavera, uno de nosotros (Dixon) subió al metro de Londres en la estación de Mile End, camino del aeropuerto de Heathrow. Al reparar en un pasajero, uno más de los tres millones que cada día acceden al suburbano, se preguntó sobre la probabilidad de que este se apease en Wimbledon. ¿Cómo averiguarlo, dada la enorme cantidad de rutas posibles? Al reflexionar sobre ello, se percató de que el problema guardaba grandes semejanzas con la clase de preguntas a las que se enfrentan los físicos teóricos cuando intentan predecir el resultado de las colisiones entre partículas que se llevan a cabo en los aceleradores modernos.

En el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, se hacen chocar protones que viajan a velocidades próximas a la de la luz y se analizan los productos de la colisión. La construcción del acelerador y los detectores ha requerido explotar hasta el límite la tecnología de nuestros días. Aunque mucho menos llamativo, interpretar los resultados de los choques supone otro reto igual de imponente. A primera vista, puede parecer extraño: los teóricos conocen muy bien el modelo estándar de la física de partículas y lo emplean de forma rutinaria para predecir el resultado de todo tipo de experimentos. Para ello, aplican ciertas técnicas de cálculo propuestas hace más de sesenta años por el célebre Richard Feynman. Todo físico de partículas aprende los métodos de Feynman en la universidad. Cualquier libro o revista de física de partículas dirigido al gran público se basa en las ideas de Feynman.

Con todo, dichos métodos se muestran ineficientes para resolver algunos problemas actuales. Aunque proporcionan una visión muy intuitiva que nos permite captar la esencia de los procesos más simples, oponen una dificultad notable cuando deseamos obtener resultados muy precisos: todos los ordenadores del mundo trabajando juntos no bastarían para determinar con total exactitud el producto de una sola de las colisiones del LHC. Pero, si no somos capaces de predecir las consecuencias de las leyes de la física que conocemos bien, ¿cómo albergar la esperanza de identificar un proceso nunca antes observado? Por lo que sabemos, el LHC podría haber mostrado ya algunos de los secretos de la naturaleza y nosotros no habernos percatado de ello, puesto que carecemos de los métodos necesarios para resolver las ecuaciones del modelo estándar con la precisión necesaria.

Durante los últimos años, los autores y otros expertos hemos trabajado en el desarrollo de un nuevo método de cálculo en física de partículas, el cual sortea las complejidades de las que adolece la técnica de Feynman. Bautizado con el nombre de método unitario, este puede verse como una herramienta muy eficiente para determinar la probabilidad de que un viajero del suburbano descienda en una estación determinada. Para ello, explota el hecho de que las opciones de las que el usuario dispone en cada nodo de la red son bastante limitadas y que cada una de ellas puede descomponerse en probabilidades simples para una secuencia de acciones. Varios problemas que tradicionalmente se han considerado intratables en física de partículas han sido resueltos gracias a esta idea. Las respuestas que obtenemos nos permiten entender con una minuciosidad sin precedentes las predicciones de las teorías en vigor, lo cual nos facultará para reconocer un nuevo fenómeno cuando este se produzca. Además, esta técnica ha arrojado abundantes resultados relativos a cierta extensión del modelo estándar que reviste especial interés, puesto que se considera un peldaño fundamental en el camino hacia una teoría última de la naturaleza.

El método unitario constituye algo más que un simple truco de cálculo: sugiere una visión radicalmente nueva de las teorías de partículas, gobernadas por simetrías insospechadas que revelan una elegancia escondida en el modelo estándar. En concreto, nos ha indicado un camino inesperado en la búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad que unifique la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad general de Einstein. Hasta los años setenta del pasado siglo, se pensaba que la gravedad se comportaba de forma similar a las demás interacciones, por lo que se buscaron extensiones de las teorías conocidas que in-

EN SÍNTESIS

Nuestro conocimiento sobre las colisiones entre partículas ha vivido una revolución silenciosa. Los conceptos introducidos por Richard Feynman han llegado al límite de su utilidad. Junto a otros expertos, los autores han desarrollado una nueva técnica de cálculo.

Gracias a ella resulta posible predecir con una precisión extrema los resultados de las colisiones que se llevan a cabo en el Gran Colisionador de Hadrones. Ello reviste una gran utilidad a la hora de identificar procesos físicos novedosos y nuevas interacciones.

Pero las implicaciones del nuevo método de cálculo son más profundas. Este ha rehabilitado la viabilidad de las teorías de supergravedad, propuestas en los años ochenta para unificar la gravedad con el resto de las interacciones fundamentales.

corporasen la gravitación. Sin embargo, al aplicar los métodos de Feynman a dichas ampliaciones, se obtenían resultados carentes de sentido o plagados de complejidades matemáticas inabordables. La gravedad parecía comportarse de un modo muy distinto del resto de las interacciones. Desalentados, los físicos buscaron una salida en ideas más revolucionarias, como la supersimetría o la teoría de cuerdas.

El método unitario ha permitido realizar cálculos que en los años ochenta se tenían por imposibles. Hemos aprendido que algunas de las presuntas incoherencias no existen en realidad. En el fondo, la gravedad sí se asemeja al resto de las interacciones, pero con una sutileza inesperada: viene a ser una «doble copia» de la interacción fuerte, la responsable de mantener unidos a los quarks en los núcleos atómicos. Del mismo modo que esta fuerza se transmite por medio de ciertas partículas denominadas gluones, la gravedad debería quedar mediada por otro tipo de cuanto: el gravitón. En la nueva imagen de la gravedad que nos sugiere el método unitario, un gravitón se comporta como dos gluones ligados. Este concepto no deja de resultar extraño. Por ahora, los expertos carecen de una idea intuitiva acerca de su significado. Con todo, este comportamiento de doble copia nos proporciona una nueva manera de afrontar la unificación de la gravedad con el resto de las interacciones.

ÁRBOLES Y ARBUSTOS

Las técnicas de Feynman resultan muy útiles porque proporcionan un método gráfico para realizar cálculos extremadamente complejos. Estos quedan simbolizados por una serie de diagramas que representan los entresijos de una colisión entre dos o más partículas. Las pizarras de los centros de investigación de física de partículas de todo el mundo se encuentran repletas de diagramas de Feynman. Cada uno de ellos encarna una de las formas concebibles en que puede desarrollarse la interacción, algo similar a las diferentes rutas por las que puede optar un viajero del metro. Después, al aplicar a cada diagrama las reglas de cálculo descubiertas por Feynman y otros físicos —una labor en la que destacó Freeman Dyson—, podemos asignarle un número. Este se corresponde con la probabilidad de que el proceso tenga lugar de acuerdo con los pasos reflejados en el diagrama.

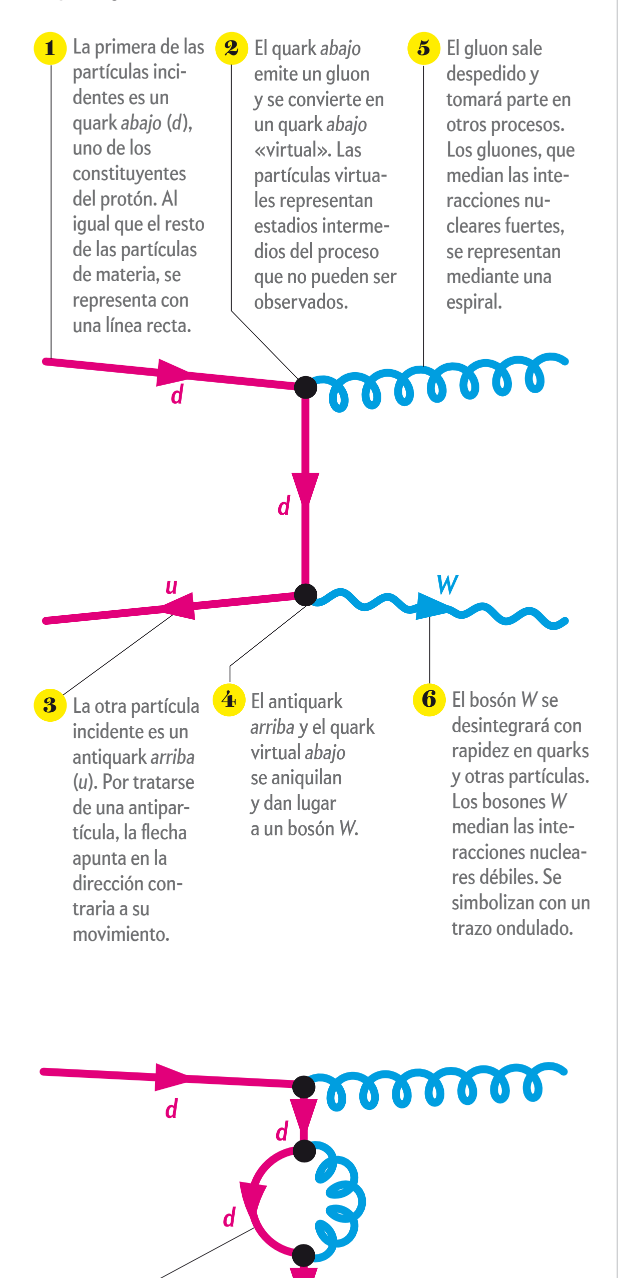
El problema reside en que, dada una colisión entre partículas, el número de diagramas que podemos dibujar es exorbitante: en principio, infinito. Sin embargo, para los procesos considerados en su día por Feynman, esta proliferación de posibilidades no afectaba demasiado al resultado final. Feynman se centró en el estudio de la electrodinámica cuántica, la teoría que describe la interacción entre electrones y fotones. Esta se encuentra gobernada por una constante de acoplamiento (adimensional) cuyo valor ronda el número 1/137. En la técnica de Feynman, cada diagrama contribuye al balance final con un peso igual a dicha constante elevada a cierta potencia, la cual resulta tanto mayor cuanto más complejo es el diagrama. Así, dado el pequeño valor de la constante de acoplamiento de la electrodinámica cuántica, la aportación de los diagramas más complicados resulta mínima, lo que implica que casi siempre pueden ignorarse. En el ejemplo del metro, esta propiedad se correspondería con un viajero que casi siempre toma la ruta más sencilla.

Dos décadas más tarde comenzaron a aplicarse los métodos de Feynman a la cromodinámica cuántica, la teoría que describe las interacciones fuertes. Pero, tal y como sugiere la palabra «fuerte», el valor de la constante de acoplamiento de esta teo-

ANATOMÍA DE UN DIAGRAMA DE FEYNMAN

Colisiones entre partículas

Las partículas elementales se atraen, se repelen, chocan, mutan y se desintegran. Para visualizar esta vorágine cuántica, el premio nóbel Richard Feynman concibió a mediados del siglo pasado un método diagramático. Aquí se representa una colisión entre dos quarks que dan lugar a un gluon y un bosón *W*.



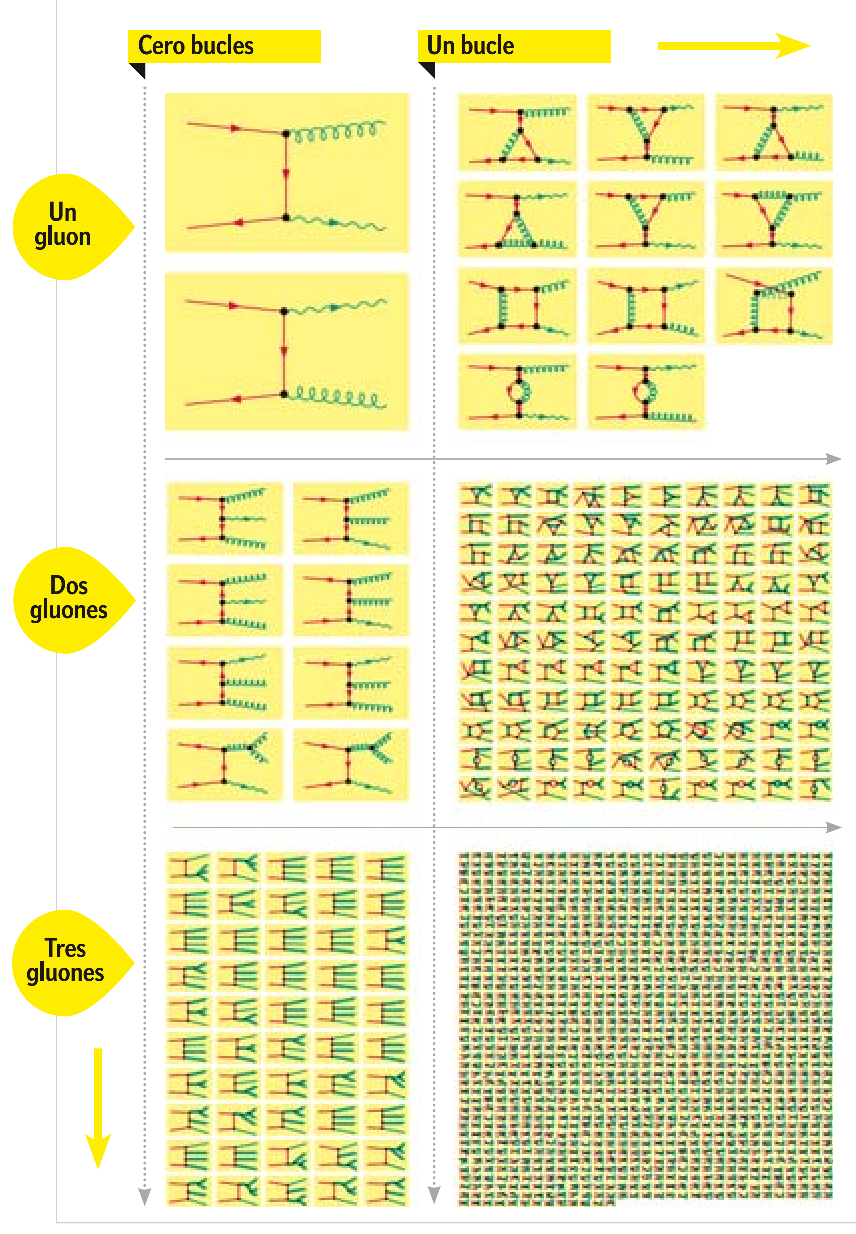
ZVI BERN, LANCE J. DIXON, DAVID A. KOSOWER Y HARALD ITA (*ilustraciones*)

ría supera con creces al de la constante electromagnética. Por tanto, deben considerarse muchos más diagramas para obtener resultados con un grado de precisión aceptable, como si se tratase de un viajero de metro que realiza un gran número de transbordos para llegar a su destino. Por fortuna, a las elevadas energías a las que trabaja el LHC, el valor de la constante de acoplamiento de la cromodinámica cuántica disminuye. Ello permite predecir el resultado de las colisiones más sencillas a partir de un pequeño número de diagramas de Feynman.

LA DIFICULTAD DE LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN

Explosión de diagramas

Cada diagrama de Feynman simboliza una de las formas concebibles en que puede desarrollarse una interacción entre partículas. El problema estriba en que, en principio, existen infinitas variantes. Una interacción entre dos quarks puede producir más de un gluon o incluir varios bucles de partículas virtuales. Al poco, los cálculos se tornan irrealizables.



Sin embargo, la complejidad de la técnica de Feynman reaparece al considerar colisiones más enrevesadas. Los diagramas de Feynman se clasifican según el número de «patas externas» y el número de «bucles». Estos últimos se corresponden con uno de los fenómenos cuánticos por antonomasia: las partículas virtuales. Aunque estas no pueden observarse con métodos directos, ejercen consecuencias medibles sobre las interacciones entre partículas. Obedecen las reglas habituales de la naturaleza, con la excepción de que su masa no tiene por qué coincidir con la de las partículas «reales» (aquellas que sí podemos observar directamente). En los diagramas, los bucles representan su efímero ciclo vital: aparecen, recorren un pequeño camino y vuelven a aniquilarse. Su masa determina la esperanza de vida: cuanto más pesadas son, menos tiempo viven.

Los diagramas de Feynman más sencillos ignoran los procesos en los que intervienen bucles, por lo que reciben el nombre de diagramas de árbol. En el caso de la electrodinámica cuántica, el diagrama más simple muestra dos electrones que se repelen mediante el intercambio de un fotón. Los diagramas más complicados añaden bucles de uno en uno. Esta manera de ordenar el cálculo se denomina «perturbativa», puesto que comienza con una aproximación del proceso completo (el diagrama de tipo árbol), la cual se va refinando al añadir diagramas con más y más bucles (perturbaciones). Por ejemplo, mientras el fotón viaja de un electrón a otro, puede convertirse en un par electrón-positrón, el cual se aniquila y se convierte de nuevo en otro fotón que retoma la trayectoria del original. En el siguiente nivel de complejidad, el electrón y el positrón pueden engendrar otras partículas virtuales. El resultado es tanto más preciso cuantos más bucles incluimos en el cálculo.

Pero incluso los diagramas de árbol pueden plantear dificultades muy serias. En el caso de la cromodinámica cuántica, si nos lanzásemos a considerar diagramas con dos gluones en el estado inicial y ocho en el estado final, deberíamos dibujar 10 millones de diagramas de árbol y calcular la probabilidad asociada a cada uno de ellos. Frits Berends, de la Universidad de Leiden, y Walter Giele, ahora en el Fermilab, desarrollaron durante los años ochenta un método recursivo para resolver este tipo de diagramas de árbol. Sin embargo, su propuesta carece de una extensión obvia para incluir bucles. Aún peor: la introducción de un solo bucle provoca una explosión en el número de diagramas y en la complejidad para evaluarlos. Las expresiones matemáticas podrían llenar con facilidad una enciclopedia. La potencia de cálculo de los ordenadores modernos permite afrontar algunos casos muy concretos, pero pronto sucumbe ante esa ingente proliferación de partículas y bucles.

Lo que comenzó como un método para entender el mundo microscópico puede termi-

nar sumiéndolo en la oscuridad. Los diagramas de Feynman resultan a menudo extremadamente barrocos, por lo que si hemos de hacer malabares con un gran número de ellos le perdemos la pista a la física subyacente. Sin embargo, exhiben una propiedad que a primera vista parece increíble: el resultado final, calculado a partir de la suma de todas esas contribuciones tan complejas, puede ser muy sencillo. Numerosos diagramas rinden aportaciones de signo opuesto y acaban cancelándose. En ocasiones, cálculos que incluyen millones de diagramas se condensan en uno solo. Esta propiedad nos sugiere que los diagramas de Feynman no constituyen la herramienta óptima para este trabajo. Debe existir un método mejor.

MÁS ALLÁ DE LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN

Con el paso de los años, una alternativa fue cobrando forma. Nuestras aportaciones en esta búsqueda llegaron a principios de los noventa, cuando dos de nosotros (Bern y Kosower) descubrimos que la teoría de cuerdas permitía simplificar algunos cálculos en cromodinámica cuántica, pues resumía todos los diagramas relevantes en una sola expresión. Algo después, los tres empleamos dicha fórmula para analizar un proceso que hasta entonces nadie había logrado entender en detalle: la dispersión de dos gluones en tres gluones. Aunque su estudio resultaba muy complicado para los estándares de la época, demostramos que todas sus propiedades podían recogerse en una fórmula sorprendentemente sencilla que ocupaba una sola página.

Dicha expresión se mostraba tan simple que, junto con David Dunbar, por entonces en la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), descubrimos que el proceso completo podía entenderse en términos de un principio denominado unitariedad. La unitariedad impone que las probabilidades asociadas a todos los resultados posibles sumen uno. (En sentido estricto, cada una de las cantidades que calculamos no son probabilidades, sino la raíz cuadrada de una probabilidad, pero este detalle no reviste demasiada importancia para lo que sigue.) La unitariedad se encuentra implícita en la técnica de Feynman, pero no suele resultar evidente en el desarrollo de un cálculo complejo. Por tanto, desarrollamos un método de cómputo basado en dicho principio. La idea de fundamentar los cálculos en el principio de unitariedad se remonta a los años sesenta, pero con el tiempo cayó en desuso. Como sucede a menudo en investigación, una vieja técnica fue rescatada años más tarde con otra apariencia.

La clave del éxito del método unitario estriba en que evita el uso directo de partículas virtuales, las principales responsables de que la técnica de Feynman se torne intratable. Las partículas virtuales ejercen efectos reales y espurios. Por definición, estos últimos han de cancelarse en el resultado final, por lo que constituyen un exceso de equipaje matemático que podemos alegrarnos de dejar atrás.

Para entender mejor la idea, volvamos a nuestra analogía del metro de Londres y a la probabilidad de que una persona que comienza su viaje en Mile End se apee en Wimbledon. La técnica de Feynman prescribe tener en cuenta *todos* los caminos posibles, lo cual ha de tomarse en un sentido literal: además de considerar las rutas que transcurren por pasillos y túneles, hemos de incluir los trayectos a través de las paredes y las sendas por las que no circula el metro. Estos caminos serían análogos a las contribuciones espurias de las partículas virtuales. Al final del cálculo se cancelan, pero necesitamos incluirlas en los pasos intermedios para obtener el resultado correcto. Con el método unitario, solo hemos de considerar las rutas que tienen sentido. La probabilidad de que una persona siga un camino particular se obtiene al dividir el problema: ¿cuál es la probabilidad de que un pasajero haga transbordo en cada una de las paradas? Este proceso reduce de manera espectacular el número de cálculos necesarios.

La elección entre el método de Feynman y el unitario no plantea una disyuntiva entre equivocado y acertado. Ambos procedimientos se basan en los mismos principios físicos y arrojan idénticos valores para las probabilidades. Sin embargo, representan distintos niveles de descripción. Entre las decenas de millones de diagramas de Feynman que hace falta incluir para describir una colisión compleja, cada uno de ellos vendría a ser como una molécula en un fluido. En principio, el comportamiento del líquido puede determinarse a partir de la dinámica de las moléculas que lo componen. Pero, en la práctica, esto solo resulta aplicable a una gota microscópica y, además, resulta engorroso y muy poco instructivo. La gota podría estar deslizándose por una cascada, pero esta circunstancia sería casi imposible de adivinar a partir de una descripción molecular. Por el contrario, se muestra mucho más fructífero tratar la gota con variables de alto nivel, como la velocidad del fluido, su presión o su densidad. De igual modo, en lugar de descomponer una colisión entre partículas como suma de diagramas de Feynman, podemos considerar las propiedades que describen el proceso como un todo: la unitariedad, así como otras simetrías que el método unitario hace notorias. En algunos casos pueden realizarse predicciones con una precisión absoluta. Con el método de Feynman, ello implicaría evaluar un número infinito de diagramas cada vez más complejos y, por tanto, un tiempo infinito de cálculo.

Pero las ventajas van más allá. Después de desarrollar el método unitario para los bucles de partículas virtuales, otro grupo, por entonces en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (Ruth Britto, Freddy Cachazo, Bo Feng y Edward Witten), le dio otra vuelta de tuerca. Consideraron de nuevo los diagramas de árbol y hallaron un procedimiento para calcular la colisión entre, por ejemplo, cinco partículas a partir del choque de cuatro de ellas y la desintegración de una partícula en otras dos. El resultado es impactante porque, por lo general, una colisión entre cinco partículas no guarda relación con esa secuencia de sucesos. Hay más de una forma de descomponer un choque en subprocesos más simples.

COLISIONES DE RELOJES

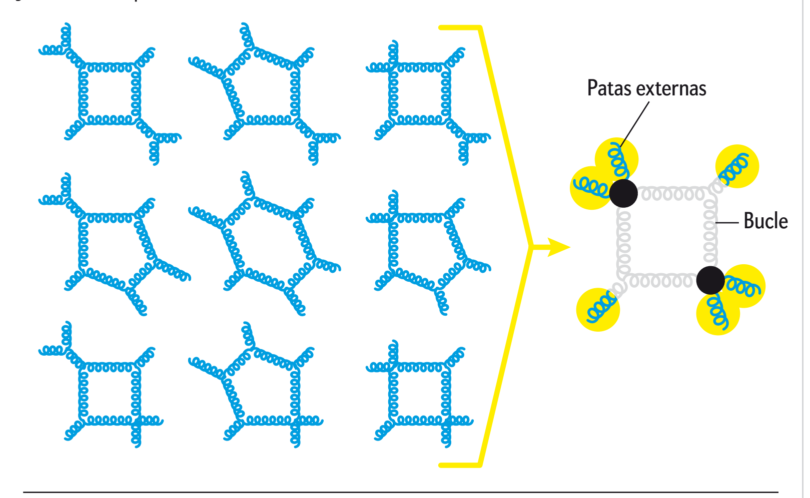
Las colisiones de protones en el LHC revisten una complejidad extrema. Feynman una vez comparó tales experimentos con intentar averiguar el funcionamiento de un reloj suizo haciéndolo añicos y estudiando los pedazos. Su método intenta esclarecer cómo se desmenuza el reloj en el transcurso del choque. Los protones no son partículas elementales, sino pequeños conglomerados de quarks y gluones. Cuando colisionan, todas esas partículas rebotan unas contra otras y pueden dar lugar a más quarks y gluones. Al final del proceso, las piezas se reagrupan en otras partículas compuestas, que salen disparadas del acelerador en haces finos que denominamos «chorros».

En medio de ese caos pueden tener lugar fenómenos que nunca antes hemos presenciado: nuevas partículas, otras simetrías e incluso dimensiones adicionales del espacio. Los instrumentos no lo tienen fácil para distinguir entre las partículas exóticas y las conocidas: las diferencias son mínimas y pueden muy bien pasarse por alto. Gracias al método unitario, podemos

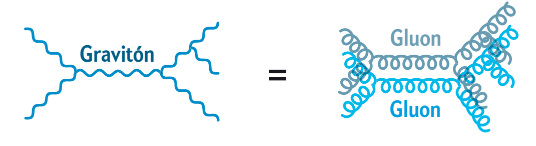
EL MÉTODO UNITARIO

Una alternativa más simple

Los autores han desarrollado un nuevo procedimiento para predecir el resultado de las interacciones entre partículas. El método unitario permite realizar cálculos antes considerados intratables, pues permite condensar varios diagramas de Feynman (*izquierda*) en uno solo (*derecha*) a partir del número de patas externas y bucles del proceso considerado.



La técnica revela propiedades físicas que, aunque se hallaban implícitas en las teorías actuales, no eran evidentes entre la marabunta de diagramas de Feynman. Una de las más asombrosas reside en la posibilidad de incluir la gravedad en el formalismo cuántico. El método unitario parece indicar que los gravitones (las partículas mediadoras de la interacción gravitatoria) se comportarían como una «copia doble» de los gluones, los transmisores de la interacción nuclear fuerte. Las investigaciones futuras habrán de explorar la viabilidad de esta idea.



describir los procesos ordinarios con extrema precisión. Ello nos permite detectar cualquier indicio de nueva física.

Joe Incandela, de la Universidad de California en Santa Bárbara y portavoz del experimento CMS del LHC, en el que trabajan más de 2000 expertos, nos formuló una pregunta relativa a la búsqueda de materia oscura. Los astrónomos han hallado multitud de indicios que apuntan a la existencia de esta sustancia misteriosa, pero los físicos aún no han identificado las partículas que la componen [*véase* «Mundos oscuros», por J. Feng y M. Trodden; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2011]. Si el LHC produjese una de esas partículas hipotéticas, pasaría desapercibida para el detector CMS. Su única huella consistiría en un balance de energía sin cuadrar. Por desgracia, una falta aparente de energía no significa necesariamente que se haya producido materia oscura. Por ejemplo, en el LHC se genera con frecuencia una partícula llamada bosón *Z*, que un quinto de las veces se desintegra en dos neutrinos, también indetectables. ¿Es posible predecir el número de partículas conocidas que simularían una señal como la que debería dejar la materia oscura?

El grupo de Incandela propuso una solución: tomar el número de fotones detectados y, a partir de dicha cantidad, extrapolar la cifra de neutrinos producidos. Después, se comprueba si ese resultado podría dar cuenta de la energía ausente. De no ser así, quizás el LHC haya generado materia oscura. Este caso constituye un buen ejemplo de los análisis indirectos que los experimentadores deben realizar como consecuencia de la imposibilidad de detectar ciertas partículas. Pero, para llevarlo a cabo, el grupo de Incandela necesitaba conocer con gran precisión cuántos neutrinos se producen por cada fotón. Con algunos colaboradores, estudiamos el problema con el método unitario. La precisión obtenida bastaba para discriminar entre distintos resultados experimentales, lo que permitió a la colaboración CMS imponer límites muy estrictos a la producción de materia oscura en el LHC. Nuestro método había demostrado su utilidad.

El éxito nos empujó a abordar proyectos más ambiciosos. Junto a Fernando Febres Cordero, de la Universidad Simón Bolívar de Caracas, Harald Ita, de la Universidad de Tel Aviv y la UCLA, Daniel Maître, de la Universidad de Durham, Stefan Höche, del Acelerador Lineal de Stanford, y Kemal Ozeren, de la UCLA, hemos obtenido la probabilidad de que el LHC produzca en una colisión un par de neutrinos y cuatro chorros. Con diagramas de Feynman, el cálculo habría sido imposible incluso para una gran colaboración que hubiese trabajado durante un decenio con los mejores ordenadores del mundo. El método unitario, en cambio, nos permitió resolver el problema en menos de un año. Para nuestra alegría, el experimento ATLAS del LHC ha comparado nuestras predicciones con sus datos y ha mostrado un acuerdo excelente. El siguiente paso será emplear estos resultados para buscar indicios de nueva física.

El método unitario también nos ha ayudado en la búsqueda de la famosa partícula de Higgs. Una de las señales de la producción de un bosón de Higgs consiste en la emisión de un electrón, un par de chorros y un neutrino. De nuevo, este último se manifiesta como un desajuste en el balance energético. Pero el mismo resultado puede obtenerse en colisiones en las que no interviene el Higgs. Una de las primeras aplicaciones del método unitario fue, de hecho, calcular con precisión la probabilidad de dichos procesos.

A VUELTAS CON LA GRAVEDAD

Aún más impresionante se muestra la aplicación del método unitario en el estudio de la gravedad cuántica. Para formular una teoría completa de la naturaleza, debemos hallar una forma de encajar la gravitación en el formalismo de la mecánica cuántica. Si la gravedad se comporta como el resto de las interacciones fundamentales, debe transmitirse por medio de gravitones. Como toda partícula, estos colisionan y se dispersan, lo que nos faculta para dibujar los diagramas de Feynman asociados. Para describir la interacción entre gravitones, a mediados de los años ochenta se intentó cuantizar la teoría de la relatividad general de la manera más sencilla posible. Sin embargo, dichos cálculos proporcionaban respuestas sin sentido, como valores divergentes para cantidades que debían ser finitas. Los infinitos no constituyen un problema per se, ya que también hacen acto de presencia en teorías válidas, como el

modelo estándar. Las divergencias pueden aparecer en los pasos intermedios de un cálculo, pero deben cancelarse en la expresión final de cualquier cantidad que podamos medir. Tales supresiones no tienen lugar en el caso de la gravedad. En un sentido más preciso, eso quiere decir que las fluctuaciones del espaciotiempo, a las que el pionero de la gravedad cuántica John Wheeler dio el nombre de «espuma espaciotemporal», escapan a nuestro control.

Una posible explicación residiría en la existencia de otras partículas aún desconocidas, las cuales se encargarían de cancelar las divergencias cuánticas. En esta idea se basan las teorías de supergravedad, que fueron objeto de un intenso estudio a lo largo de los años setenta y principios de los ochenta [*véase* «Supergravedad y la unificación de las leyes de la física», por D. Z. Freedman y P. van Nieuwenhuizen; Investigación y Ciencia, abril de 1978]. Pero la expectación original murió cuando, por medio de argumentos indirectos, se sugirió que los infinitos persistirían al considerar diagramas con tres o más bucles. Todo parecía indicar que la supergravedad estaba abocada al fracaso.

La decepción condujo a muchos a estudiar la teoría de cuerdas, la cual supone una ruptura radical con los principios que rigen el modelo estándar. Según ella, las partículas elementales (quarks, gluones, gravitones...) no serían puntuales, sino que se corresponderían con las vibraciones de objetos unidimensionales. Así, en lugar de concentrarse en un solo punto, la interacción entre partículas se esparce a lo largo de la cuerda, lo que evita la aparición de infinitos. Por otro lado, la teoría de cuerdas sufre sus propios problemas: por ejemplo, no realiza predicciones definitivas sobre fenómenos observables.

PROBLEMA DOBLE

A mediados de los años noventa, Stephen Hawking apostó por concederle otra oportunidad a la supergravedad. Argumentó que los estudios del decenio de los ochenta se basaban en ciertos atajos de validez dudosa. Pero Hawking no logró convencer a la comunidad, puesto que existía una muy buena razón para realizar dichas simplificaciones: el cálculo completo se hallaba fuera del alcance del más brillante mago de las matemáticas. Para asegurar si un diagrama de Feynman con tres bucles de gravitones produce divergencias, necesitaríamos evaluar 10^{20} términos. Con cinco bucles, aparecen 10^{30} términos, uno por cada átomo existente en los detectores del LHC. El problema parecía condenado a permanecer en el cajón de los problemas sin resolver.

El método unitario ha dado la vuelta a esa situación. Gracias a él, los 10^{20} términos de las técnicas de Feynman pueden reducirse a pocas docenas. Junto con Radu Roiban, de la Universidad estatal de Pensilvania, John Joseph Carrasco y Henrik Johansson, estudiantes de doctorado en la UCLA, hemos descubierto que las conclusiones de los años ochenta eran falsas. Cantidades a las que se les había asignado un valor divergente eran, en realidad, finitas. En las teorías de supergravedad, las fluctuaciones cuánticas del espaciotiempo resultan mucho más inocuas de lo que habíamos imaginado. Si se nos ofrece un par de vasos de buen vino, es posible que se nos vea especular sobre la posibilidad de que una de esas teorías de supergravedad se corresponda con la tan buscada teoría cuántica de la gravedad.

Para mayor sorpresa, tres gravitones interaccionan como dos copias de tres gluones. Esta propiedad de la «doble copia» parece persistir con independencia del número de partículas que colisionen o la cantidad de bucles que consideremos. A modo de metáfora, podríamos decir que la gravedad se comporta como el cuadrado de las interacciones fuertes. Aún llevará un tiempo traducir estas relaciones matemáticas en intuición física, así como comprobar si esta peculiaridad sobrevive ante cualquier circunstancia. Pero, por el momento, hemos aprendido que quizá la gravedad no se diferencie tanto del resto de las interacciones.

Como es habitual en ciencia, al resolver una cuestión aparece otra. Justo después de efectuar nuestros cálculos a tres bucles, los escépticos comenzaron a preguntarse si no aparecerían problemas al considerar cuatro bucles. Y, como también sucede a menudo, decidimos apostar una botella de vino sobre el resultado: un Barolo contra un Chardonnay del valle de Napa. Cuando realizamos los cálculos no encontramos ninguna dificultad, lo que nos permitió cerrar el debate... y descorchar una botella de Barolo.

¿Se encuentra la supergravedad libre de divergencias, o sus simetrías solo permiten cancelarlas cuando consideramos pocos bucles? En tal caso, los problemas deberían comenzar a asomar con cinco bucles y, con siete, las fluctuaciones cuánticas deberían crecer lo suficiente como para producir infinitos. David Gross, profesor en la Universidad de California en Santa Bárbara y premio nóbel, ha prometido una botella de Zinfandel de California a quien demuestre la ausencia de divergencias a siete bucles. Con el ánimo de saldar la apuesta, algunos nos hemos puesto manos a la obra. Una supergravedad finita a siete bucles dejaría pasmados a los escépticos y convencería a muchos de las posibilidades de la teoría. No obstante, es cierto que aunque esta carezca por completo de divergencias, no capta otros efectos (llamados «no perturbativos») que no se manifiestan en las expansiones bucle a bucle. Para entender estos fenómenos puede que necesitemos una teoría aún más profunda, como la teoría de cuerdas.

A los físicos nos agrada pensar que las teorías emergen a partir de una serie de principios, como la relatividad, la mecánica cuántica o ciertas simetrías. Pero, a veces, surgen al examinar los principios que ya conocemos. Esta revolución silenciosa de la física de partículas nos ha permitido estudiar las consecuencias del modelo estándar con gran detalle, así como mejorar nuestro potencial para descubrir nueva física. Todavía más interesantes se muestran las implicaciones de teorías antiguas, entre las que se encuentra un camino antaño vetado para unificar la gravedad con el resto de las interacciones. Descubrir los secretos de las colisiones entre partículas ha resultado muy distinto de viajar en el predecible metro de Londres. Más bien, ha sido como dejarse llevar en el autobús noctámbulo de Harry Potter, donde nunca se sabe lo que va a ocurrir.

PARA SABER MÁS

Lovely as a tree amplitude: Hidden structures underlie Feynman diagrams. Steven K. Blau en *Physics Today*, vol. 57, n.º 7, pág. 19, julio de 2004.

La física y los diagramas de Feynman. David Kaiser en *Investigación y Ciencia*, n.º 348, págs. 74-83, septiembre de 2005.

Cancellations beyond finiteness in $N = 8$ supergravity at three loops. Z. Bern et al. en *Physical Review Letters*, vol. 98, n.º 16, 20 de abril de 2007.

Supergravity: Finite after all? Kellogg Stelle en *Nature Physics*, vol. 3, págs. 448-450, julio de 2007.

Pulling QCD predictions out of a (black) hat. Daniel Maître en *SLAC Today*, 7 de agosto de 2008.

***Twists* del destino.** George Musser en *Investigación y Ciencia*, n.º 409, págs. 8-9, octubre de 2010.

Precise predictions for $W + 4$ jet production at the Large Hadron Collider. C. F. Berger et al. en *Physical Review Letters*, vol. 106, n.º 9, 1 de marzo de 2011.

Pedro J. Sanz es profesor del departamento de ingeniería y ciencia de los computadores en la Universidad Jaime I de Castellón, donde dirige el Laboratorio de Interacción y Sistemas Robóticos.

Pere Ridao dirige el Centro de Investigación en Robótica Submarina de la Universidad de Gerona y es profesor del departamento de ingeniería de los computadores de esta universidad.

Gabriel Oliver es el responsable del grupo de investigación en Sistemas, Robótica y Visión de la Universidad de las Islas Baleares y profesor del departamento de ciencias matemáticas e informática del mismo centro.



ROBÓTICA

Vehículos autónomos bajo el agua

Se están desarrollando robots submarinos dotados de gran autonomía. Facilitarán las operaciones de salvamento y serán de gran utilidad para la arqueología, las ciencias marinas y la industria del petróleo

Pedro J. Sanz, Pere Ridao y Gabriel Oliver

Desde la Antigüedad el hombre ha soñado con descubrir nuevos territorios inexplorados en tierra firme, bajo el agua o en el espacio exterior. Este impulso por aventurarse en regiones desconocidas parece innato al ser humano, aunque siempre puedan existir otras motivaciones, como el acceso a nuevos recursos de toda índole. Tras muchos años de éxitos y fracasos, parece que los esfuerzos investigadores del siglo xxi podrían hacer realidad, al menos en parte, dichos sueños, en lo que al fondo de los océanos se refiere.

El avance conjunto de distintas áreas científicas y técnicas, como la robótica y la inteligencia artificial, incluidas las telecomunicaciones, el control de procesos, el diseño de sensores y actuadores, o de acumuladores energéticos eficientes, por citar algunas, está facilitando el desarrollo de nuevos robots submarinos, cada vez más autónomos, robustos y fiables, que podrán llevar a cabo operaciones de intervención, es decir, aquellas donde se requiere contacto físico, consideradas de ciencia ficción hasta hace bien pocos días.

A ese respecto, existen en la actualidad un número creciente de aplicaciones de robótica submarina en campos tan diver-

EN SÍNTESIS

Desde la Antigüedad, el hombre ha perseguido el sueño de explorar los fondos marinos con el propósito de comprender su naturaleza y explotar sus recursos. Para ello ha desarrollado numerosas y variadas técnicas a lo largo de la historia.

En el último decenio se ha producido un salto científico y técnico en este campo, mediante el diseño de robots submarinos que operan de forma autónoma.

Los nuevos dispositivos, preparados para realizar varios tipos de intervención, están llamados a sustituir a los actuales vehículos teleoperados.

CORTESÍA DE LOS AUTORES



Los nuevos vehículos autónomos submarinos como el Girona 500 permiten realizar tareas en el mar de manera totalmente autónoma, sin ningún cable «umbilical» que los conecte con el barco nodriza.



Mediante el Liropus 2000, un vehículo teleoperado del Instituto Español de Oceanografía, se han explorado las recientes emanaciones submarinas del volcán de la Isla de Hierro, frente a La Restinga.

CORTESÍA DE FRANCISCO SÁNCHEZ, INSTITUTO ESPAÑOL DE OCEANOGRAFÍA

sos como el salvamento y rescate, la arqueología, las ciencias marinas o la industria del petróleo y sus derivados, que no se limitan solo a la exploración u observación. Requieren, además, la posibilidad de interaccionar físicamente con el entorno. Ello obliga a dotar los vehículos submarinos de brazos manipuladores robóticos, además de sensores y actuadores de todo tipo. El desarrollo de estos dispositivos ha dado lugar a una nueva tecnología, todavía emergente, de intervención autónoma submarina.

EL MEDIO MARINO

Alrededor del 70 por ciento de la superficie de nuestro planeta está cubierta por agua. El 95 por ciento de esta se concentra en los océanos. La profundidad media de los océanos es de unos 3700 metros. Pero es en las aguas poco profundas (a menos de 300 metros) donde se encuentra la plataforma continental, la zona que sustenta la mayor riqueza de vida marina y una gran parte de la producción mundial actual de petróleo y gas.

La exploración del medio submarino entraña varias dificultades para los humanos: la presión aumenta drásticamente con la profundidad (1 atmósfera por cada 10 metros); la percepción visual es deficiente, aun contando con la obligada iluminación artificial mediante focos; las comunicaciones se interrumpen; circulan corrientes y se producen cambios de temperatura, etcétera. Por todo ello, el límite para la realización de inmersiones subacuáticas mediante el uso de escafandras se sitúa (según la mezcla de gases que se utilice) entre cincuenta y cien metros de profundidad. De ahí que se estén desarrollando vehículos submarinos robotizados, con capacidad de realizar misiones que serían imposibles para el ser humano.

Asimismo, la sociedad es cada vez más consciente de las limitaciones de las operaciones subacuáticas actuales. El impacto mediático ha sido decisivo para ello. Pocas personas escaparon a la angustia transmitida por los medios en el desenlace fatal del hundimiento, a poco más de 100 metros de profundidad, del submarino nuclear de la armada rusa Kursk en agosto de 2000. Pensemos también en desastres ecológicos como el hundimiento del superpetrolero Prestige en 2002, o la más reciente destrucción de la plataforma petrolífera de BP en abril de 2010 y el posterior derrame en el golfo de México. Pero no todo son malas noticias. Los robots submarinos han hecho posible la exploración de buques hundidos como el Titanic o la recuperación de toda clase de objetos. En 2011, la «robótica submarina de intervención» permitió recuperar, mediante vehículos teleoperados, las cajas negras del avión de Air France desaparecido dos años antes en su ruta de Río de Janeiro a París.

La necesidad de avanzar en este campo se ha traducido en una notable inversión por parte de organismos privados, así como públicos, en los centros de investigación más avanzados de todo el mundo.

AVANCES HISTÓRICOS

El interés del ser humano por desarrollar una tecnología que le permitiera acceder a un espacio tan hostil como el submarino se remonta a la antigua Grecia. Ya durante la Edad Media y, sobre todo, gracias a genios como Leonardo da Vinci, aparecen algunos artefactos con este fin. No obstante, el desarrollo del submarino moderno no se consolida hasta bien entrado el siglo xx, por desgracia debido al fuerte impulso que supusieron las dos guerras mundiales en Europa. Esta tecnología deviene de los primeros sumergibles desarrollados allá por el siglo xvii y de los grandes avances de finales del xix, gracias, entre otros, a inventores como Narcís Monturiol o Isaac Peral. (Conviene no olvidar que el control de las primeras máquinas residía siempre en la persona que pilotaba el vehículo submarino.) Todos estos desarrollos previos han ejercido una influencia notable en la robótica submarina actual, sobre todo en lo referente al diseño del vehículo, su propulsión y sistemas de comunicación y navegación.

Ya en la década de los sesenta, llegó la robótica moderna, cuyos primeros prototipos industriales se basaban en brazos mecánicos capaces de ejecutar de forma automática secuencias de operaciones previamente programadas. Cuando apareció el primer microprocesador, diseñado por Intel una década después, el «cerebro» del robot experimentó un progreso inesperado. Proliferaron todo tipo de nuevas aplicaciones, en las cuales la información procedente de distintos sensores y las nuevas arquitecturas que ligaban dicha información a los actuadores permitían adaptar de forma automática las acciones del robot a un entorno dinámico y cambiante. Así, en tan solo cincuenta años, la robótica ha sufrido una auténtica revolución, pasando de los simples manipuladores industriales a los refinados robots humanoides de nuestros días.

ROBOTS TELEOPERADOS

En la actualidad, la robótica submarina se divide en dos grandes ramas: por una parte, el desarrollo de robots autónomos para tareas de observación y exploración (AUV, de *autonomous*

underwater vehicle); por otra, el de robots submarinos teleoperados (ROV, de *remotely operated vehicle*), que incorporan manipuladores para misiones de intervención. El uso de los ROV se extendió con cierta prontitud a partir de los años ochenta por las múltiples ventajas que ofrecían con respecto a los sistemas utilizados hasta ese momento, sobre todo submarinos tripulados o buzos profesionales. Los nuevos robots submarinos evitaban poner en riesgo la vida humana y aumentaban de manera significativa los tiempos de permanencia en el fondo, lo que incrementaba la rentabilidad económica.

La principal característica de un ROV es que puede teleoperarse directamente desde un barco nodriza; ambos se comunican mediante un cable umbilical. A través de este cable se intercambian las instrucciones de control del sistema, que ejecuta el piloto, y puede transferirse la alimentación necesaria para los motores y actuadores, sensores y demás dispositivos a bordo. Aparece aquí una figura clave: el usuario experto. Este debe controlar, mediante un sistema informático diseñado al efecto, todos los elementos clave del vehículo teleoperado, que puede incluir uno o varios manipuladores, según el modelo. Por tanto, el usuario se halla en todo momento dentro del bucle de control del sistema, lo cual, paradójicamente, lejos de ser una ventaja, acaba convirtiéndose en un inconveniente, por el estrés que provoca. Asimismo, el cable umbilical suele complicar las acciones de control: puede enredarse fácilmente, lo que dificulta la intervención, o incluso llegar a partirse y ocasionar la pérdida del vehículo.

AUTONOMÍA BAJO EL AGUA

Debido a las limitaciones que presentan los ROV, desde hace una década se ha comenzado a desarrollar el siguiente eslabón en su evolución tecnológica: los AUV para intervenciones, o I-AUV (*autonomous underwater vehicles for intervention*). Su principal ventaja reside en un gran nivel de autonomía. En síntesis, se trata de un robot submarino dotado de uno o varios robots manipuladores que le permiten operar de forma autónoma (a diferencia de los ROV, que suelen requerir un gran esfuerzo logístico). Su objetivo a largo plazo es poder ejecutar, de forma completamente autónoma, una misión previamente especificada por un usuario. Ello constituye un auténtico reto técnico, debido a los siguientes puntos críticos.

En primer lugar, dado que el nivel de autonomía guarda una relación directa con la capacidad para resolver problemas de forma independiente, estos vehículos requieren una gran interrelación entre percepción y acción. Ello exige el empleo de técnicas propias de la inteligencia artificial para planificar y ejecutar las intervenciones.

En segundo lugar, estos vehículos necesitan baterías de dimensiones y peso reducidos, y larga duración, que les proporcionen una autonomía energética suficiente.

Asimismo, deben resolverse problemas relacionados con las comunicaciones. Los módems acústicos actuales solo permiten enviar unos pocos octetos (*bytes*) por segundo; los módems electromagnéticos, por su parte, no permiten abordar la distancia entre el vehículo y el barco de soporte.

Otro inconveniente estriba en la inestabilidad del medio. La necesidad de controlar el robot en un medio muy dinámico, con corrientes, obliga a desarrollar modelos hidrodinámicos muy refinados y actuadores capaces de ejecutar el control de la navegación en condiciones adversas.

Por fin, la hostilidad del medio lastra la percepción, puesto que dificulta la captura de información sensorial. Bajo el agua

RAUVI

Anatomía de un robot submarino

El RAUVI, un vehículo submarino diseñado para llevar a cabo intervenciones de forma autónoma, consta de tres partes, cada una desarrollada por uno de los centros que colaboran en el proyecto: el vehículo (Universidad de Gerona), el brazo manipulador (Universidad Jaime I) y el sistema de visión estéreo (Universidad de las Islas Baleares).

El robot puede operar a una profundidad máxima de 500 metros. Unas baterías de 2,2 kilovatios hora le proporcionan una autonomía de hasta 8 horas (tiempo que varía en función de la velocidad, la configuración del sistema de propulsión, el tipo de intervención y otros parámetros). En el aire pesa unos 160 kilogramos; en el agua es totalmente neutro. El cerebro del sistema lo constituyen tres ordenadores interconectados que controlan, respectivamente, las acciones del vehículo, el brazo manipulador y la cámara estéreo. Vehículo y brazo disponen de sensores específicos. El manipulador (ampliación) lleva ensamblada una cámara y posee cuatro grados de libertad: giro, hombro, codo y muñeca (el grado de libertad que permite abrir o cerrar la pinza, la mordaza, se considera aparte, ya que no altera la movilidad del robot).



CORTESÍA DE LOS AUTORES

RAUVI EN ACCIÓN



no puede garantizarse la visibilidad, por lo que debe recurrirse a sistemas de localización como el sónar.

EVOLUCIÓN TECNONÓGICA

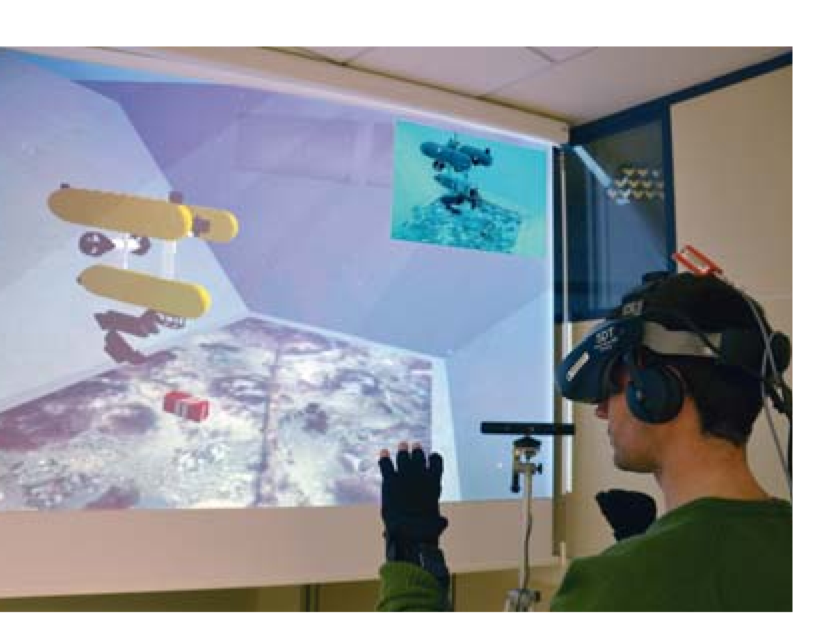
El desarrollo de vehículos subacuáticos de intervención autónoma corresponde a un campo de investigación emergente. Los trabajos pioneros se publicaron en la década de los noventa. Entre los primeros intentos de diseñar un AUV coordinado con un brazo robótico destacan el sistema ODIN, de la Universidad de Hawái, el OTTER, del Centro de Investigación MBARI de California, y el VORTEX/PA10 (dentro del proyecto UNION), financiado por la Comisión Europea (CE). Aunque estos sistemas representaron cierto progreso para el desarrollo del I-AUV, se usaron sobre todo a modo de banco de pruebas, para demostrar conceptos como el modelado hidrodinámico avanzado de un brazo robótico submarino, y la simulación y el control del acoplamiento entre el AUV y el brazo robótico. A mediados de los noventa, el proyecto AMADEUS, financiado por la CE, avanzó en la manipulación diestra submarina: logró el control coordinado de dos manipuladores montados sobre una base fija.

Posteriormente se han propuesto nuevos enfoques para reducir la complejidad del movimiento acoplado del sistema vehículo-manipulador, con el fin de que sea operativo en el mar abierto. En 2001, un consorcio europeo, liderado por la compañía Cybernetix, ensayó el concepto híbrido AUV/ROV en el proyecto SWIMMER. En este caso, una lanzadera autónoma (AUV) que transporta un ROV se lanza desde un buque para que, de modo autónomo, navegue hasta una estación de acoplamiento submarina. Dicha estación proporciona una conexión al AUV, de modo que el ROV puede llevar a cabo sus operaciones sin necesidad de ningún cable umbilical que le conecte con la superficie.

A ese proyecto siguieron otros dos: ALIVE y SAUVIM. El prototipo desarrollado por ALIVE consta de un AUV de intervención, con un brazo manipulador que permite operar en paneles especiales, utilizados en las plataformas petrolíferas. En particular, ha demostrado su capacidad de navegación autónoma hacia una posición cercana a un panel de intervención bajo el agua, utilizando un sónar de imagen, acercándose y acoplándose al panel con la ayuda de un sistema de visión y dos pinzas hidráulicas. Por otra parte, SAUVIM, de la Universidad de Hawái, usa un brazo manipulador, diseñado inicialmente en el proyecto AMADEUS, para la recuperación de objetos. Para simplificar su control, se asegura una gran diferencia de masa entre el AUV de 6 toneladas y el manipulador a bordo; ello permite que el control del sistema vehículo-manipulador pueda acometerse de forma desacoplada.

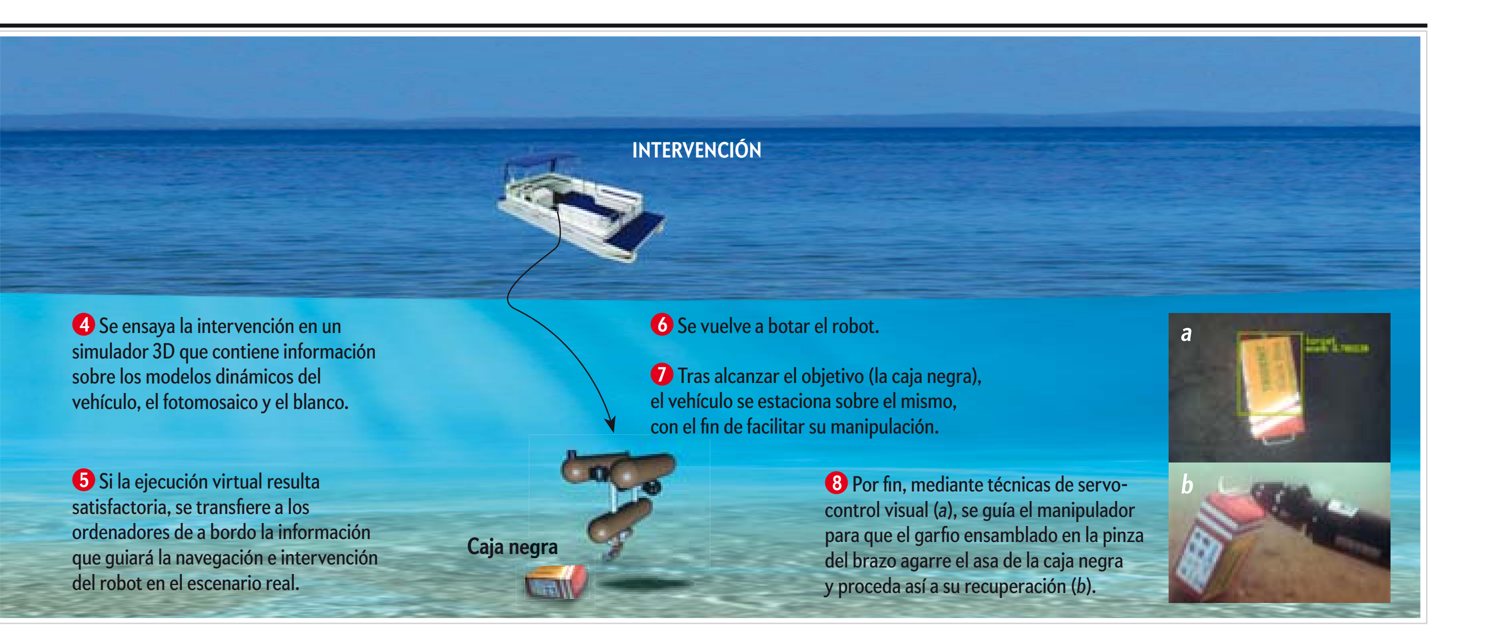
PROYECTOS EN MARCHA

Entre los proyectos actuales sobre robótica submarina de intervención destaca el europeo TRIDENT (*Marine robots and dexterous manipulation for enabling autonomous underwater mul-*



Mediante una interfaz gráfica que permite realizar simulaciones 3D e inmersiones virtuales, el usuario identifica el blanco de la misión y determina el tipo de intervención que deberá llevar a cabo el robot submarino.

CORTESÍA DE LOS AUTORES



tipurpose intervention missions, www.irs.uji.es/trident) y el español RAUVI (*Reconfigurable AUV for intervention*, www.irs.uji.es/rauvi), que tras su reciente finalización en 2011 ha encontrado continuidad en el actual TRITON (*Multisensory based underwater intervention through cooperative marine robots*, www.irs.uji.es/triton). En él participan de forma coordinada tres universidades: Gerona (UdG), Islas Baleares (UIB) y Jaime I de Castellón (UJI).

La estrategia de RAUVI se ha dividido en dos fases. La primera corresponde a la captura de datos de la región de interés. A través de una interfaz gráfica, un usuario establece la trayectoria que deberá seguir el vehículo. Una vez ha sido lanzado al agua, este graba (de forma completamente autónoma) una secuencia de vídeo siguiendo dicha trayectoria sobre el fondo marino, navegando siempre a la altura establecida y adaptándose a la superficie de forma dinámica gracias a los sensores a bordo. La trayectoria se define de tal modo que no queda ninguna porción del fondo sin cubrir por la secuencia de vídeo. Al terminar este barrido, el AUV se dirige a la superficie, vuelca los datos en la estación de trabajo y, mediante las herramientas informáticas diseñadas al efecto, se construye el correspondiente fotomosaico de la región explorada. En la interfaz gráfica, el usuario selecciona el objetivo que tendrá que alcanzar el robot y el tipo de intervención que deberá realizar.

Empieza luego la segunda fase de la operación: en un simulador gráfico, se lleva a cabo un ensayo virtual de la intervención especificada. Ello permite detectar y subsanar, antes de la ejecución real, cualquier tipo de error. A continuación se «inyecta» esta información en los ordenadores de a bordo del I-AUV y se vuelve a lanzar al agua. Así, el robot regresa al mar con los datos necesarios para navegar hasta su objetivo, estabilizarse de forma que el blanco quede dentro del espacio de trabajo del manipulador robótico a bordo, y acometer la intervención previamente seleccionada y ejecutada en el simulador.

Esa estrategia en dos fases se ha ensayado con éxito en la demostración final del proyecto RAUVI, realizada en octubre de 2011 en el puerto de Rosas (Gerona). La intervención consistió en la búsqueda y recuperación de una caja negra idéntica a las que utilizan hoy en día los aviones comerciales. El éxito de estos experimentos constituye un hito en el desarrollo de esta nueva tecnología.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO

En la actualidad, las aplicaciones que requieren algún tipo de intervención subacuática se resuelven mediante vehículos ROV. Si bien adolecen de varios inconvenientes, constituyen la única opción disponible en el mercado actual. Los I-AUV se proponen sustituir a los ROV en aquellos ámbitos de aplicación que permitan programar previamente la misión de intervención. Con todo, esta tecnología emergente se halla todavía en fase de desarrollo y aún tardaremos algunos años en ver su implantación.

Tras el éxito de RAUVI, el proyecto TRITON, que acaba de iniciarse en 2012, garantiza una continuidad indispensable para acercar esta nueva tecnología al usuario final. Ello abre una vía a la transferencia tecnológica, una de las principales asignaturas pendientes del sistema español de I+D. En cuanto al proyecto europeo TRIDENT, quizás uno de sus mayores retos sea implementar el control entre el vehículo AUV y el manipulador, de forma que sea innecesario estabilizar ambos sistemas en el momento de la intervención, como hacen SAUVIM o RAUVI. En particular, resolver el problema de la manipulación en flotación libre (*free floating manipulation*) constituye uno de los mayores desafíos tecnológicos a los que se enfrenta este proyecto y, por ende, toda la comunidad de expertos en robótica submarina.

PARA SABER MÁS

Underwater robots part I: Current systems and problem pose y **Underwater robots part II: Existing solutions and open issues.** Lionel Lapierre (capítulos 15 y 16) en *Mobile Robots: Towards New Applications*, dirigido por Aleksandar Lazinica. InTech, 2006.
Underwater robots: Motion and force control of vehicle-manipulator systems. Gianluca Antonelli y Springer Tracts en *Advanced Robotics*, Springer Verlag, 2006.
Underwater vehicles. Dirigido por Alexander V. Itzartsev. InTech, 2009.
Reconfigurable AUV for intervention missions: A case study on underwater object recovery. Mario Prats et al. en *Intelligent Service Robotics*, vol. 5, págs. 19-31, 2012.
Página web del Laboratorio de Interacción y Sistemas Robóticos: **www.irs.uji.es**



METEOROLOGÍA

Huracán a la vista

El desarrollo de técnicas que permitan advertir tornados y huracanes con mayor antelación podría salvar cada año centenares de vidas

Jane Lubchenco y John L. Hayes

TRAS EL ESTRUENDO DE LA TORMENTA SE IMPONE UN INquietante silencio. En el cielo negro de Joplin, en Missouri, se desvanecen los tentáculos de un tornado descomunal y feroz de múltiples vórtices. Los vientos, que superan los 320 kilómetros por hora y abarcan una anchura de más de un kilómetro, se abren paso por la ciudad a lo largo de casi 10 kilómetros y destruyen colegios, un hospital, comercios y viviendas, y se llevan por delante la vida de unos 160 habitantes.

Aquella tarde de domingo, el 22 de mayo de 2011, los especialistas en predicción habían emitido una advertencia unos 20 minutos antes del suceso. La alerta de un tornado se había activado unas horas atrás y desde hacía días se realizaban pronósticos meteorológicos exhaustivos.

Los avisos habían llegado antes de lo habitual pero aparentemente no lo hicieron con la antelación necesaria. Aunque los responsables de situaciones de emergencia se hallaban en alerta máxima, gran parte de la población no lo estaba.

El tornado que arrasó Joplin fue una de las numerosas catástrofes del mismo tipo acaecidas en primavera de 2011. Un mes antes, un enjambre de tornados sin precedentes había devastado otras áreas del sur y había causado la muerte de 300 personas. El mes de abril registró la mayor actividad hasta la fecha: unos 750 tornados.

Con una cifra de 550 víctimas mortales, 2011 pasó a la historia de EE.UU. como el cuarto año con mayor número de muertes causadas por tornados. Por otra parte, el catastrófico año supuso unos altos costes económicos. Se produjeron catorce eventos meteorológicos de carácter extremo —desde el tornado de Joplin hasta inundaciones debidas a huracanes y tormentas de nieve— y los daños asociados a cada uno de ellos se estimaron en más de mil millones de dólares. La intensa actividad prosiguió a comienzos de 2012: el 2 de marzo, los tornados causaron la muerte a 40 personas en 11 estados del medio oeste y sur de EE.UU.

Las técnicas utilizadas en la predicción de fenómenos meteorológicos extremos han avanzado a lo largo de los últimos decenios, pero los científicos de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA) continúan trabajando en la mejora de radares, satélites y superordenadores para pronosticar tornados y tormentas con mayor antelación, determinar la intensidad de los huracanes y predecir inundaciones. Si los esfuerzos dan resultado, dentro de una década la población podrá recibir, por ejemplo, la alerta de un tornado importante y disponer del tiempo suficiente para asumir la noticia, reunirse con sus familiares y resguardarse.

EN SÍNTESIS

El cambio climático probablemente conllevará una mayor intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, con lluvias más torrenciales y huracanes más devastadores.

Los avances en la predicción meteorológica serán cruciales para que la población disponga de mayor tiempo de reacción ante tormentas peligrosas, lo que salvará vidas y mitigará daños en infraestructuras.

Las nuevas técnicas en radares y satélites, junto con modelos informáticos ejecutados por superordenadores más potentes, mejorarán la detección de los fenómenos meteorológicos extremos.

Una mayor antelación en la emisión de avisos solo resultará eficaz si se acompaña de una mejor estrategia para lograr que los ciudadanos reaccionen y se movilicen. Ambos esfuerzos se aúnan con el fin de aumentar la preparación de la población ante las catástrofes meteorológicas.

DAVID MAYHEW

LA IMPORTANCIA DEL RADAR

El meteorólogo Doug Forsyth dirige los planes de mejora del radar, técnica empleada en el pronóstico de gran parte de los fenómenos meteorológicos. Forsyth es director de la Unidad de Investigación y Desarrollo de Radares del Laboratorio Nacional de Tormentas Intensas de la NOAA en Norman, en Oklahoma. Aspira a que se emitan los avisos de tornado con mayor antelación, ya que algunos de los más catastróficos pueden originarse en poco tiempo y el radar constituye la herramienta fundamental para detectarlos cuando se forman.

El funcionamiento de un radar se basa en la emisión de ondas de radio que son reflejadas por partículas atmosféricas, como gotas de lluvia, partículas de hielo o incluso insectos y polvo. Los expertos en predicción meteorológica pueden conocer la localización y la importancia de las precipitaciones midiendo la intensidad de las ondas reflejadas y el tiempo que tardan en regresar al radar. Los radares Doppler que utiliza actualmente el Servicio Meteorológico Nacional de EE.UU. calculan las variaciones de frecuencia en las ondas reflejadas, de lo que se deduce la dirección y velocidad a la que se mueven las precipitaciones. Estos dos últimos parámetros permiten observar si cualquier movimiento rotatorio en el interior de una tormenta pudiera derivar en la formación de un tornado.

En 1973, los meteorólogos de la NOAA Rodger Brown, Les Lemon y Don Burgess descubrieron el alcance predictivo de dichos parámetros al analizar los datos procedentes del tornado que azotó Union City, en Oklahoma. Las imágenes por radar mostraban velocidades de alejamiento y acercamiento muy próximas entre sí. El aspecto visual de los resultados era tan extraordinario que al principio no supieron interpretarlo. Sin embargo, una vez que correlacionaron los datos con la ubicación del tornado, los bautizaron como «indicadores de vórtice de tornado». Hoy constituyen el parámetro predictivo más extendido; indica una elevada probabilidad de que se esté produciendo un tornado o de que lo haga en un futuro inmediato. Los resultados permitieron anticipar la advertencia de tornado desde una media de 3,5 minutos en 1987 hasta los actuales 14 minutos.

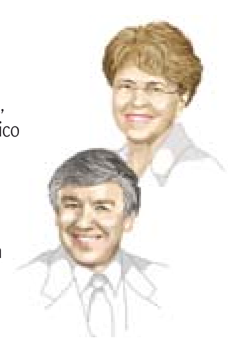
A pesar de que el radar Doppler ha supuesto un gran avance, no se trata de una técnica perfecta, ya que no permite a los meteorólogos como Forsyth distinguir entre distintas formas de partículas y, por tanto, pueden llegar a confundir una tormenta de lluvia con una de polvo. Irónicamente, la carrera profesional de Forsyth cambió de rumbo al no superar un examen ocular que relegó sus ambiciones como piloto de las fuerzas aéreas estadounidenses a una carrera como meteorólogo. Desde entonces, se ha dedicado a la mejora de los radares para obtener una imagen más precisa de la atmósfera.

La polarización dual constituye uno de los avances fundamentales. Gracias a esta técnica, los meteorólogos pueden diferenciar con mayor precisión distintos tipos y volúmenes de precipitación. En ocasiones las partículas de lluvia y granizo presentan la misma dimensión horizontal —por lo que el radar Doppler registra imágenes idénticas—, pero las primeras son más aplanadas. El reconocimiento de la forma de las partículas simplifica la laboriosa tarea de identificar características distintivas en los registros del radar. La información permite elaborar pronósticos más exactos, de modo que la población puede prepararse ante una tormenta de granizo y no de lluvia.

Los datos relativos al tamaño de las partículas ayudan también a identificar motas de residuos levantadas por tornados y tormentas fuertes. Con ello se localizan las tormentas destructivas que ocurren en un momento dado, lo que resulta de especial relevancia, por ejemplo, cuando los camioneros atraviesan un tornado invisible para el ojo humano. Aunque un tornado se halle enmascarado por las lluvias o se produzca durante la noche, la polarización dual sigue detectando las partículas de residuos en el aire.

Jane Lubchenco dirige la NOAA desde 2009. Experta en ecología marina y medioambiente, está especializada en océanos, cambio climático y la interacción entre ambiente y bienestar humano.

John L. Hayes es director del Servicio Meteorológico Nacional de la NOAA. Es responsable de la elaboración y la comunicación de alertas y predicciones meteorológicas al Gobierno, la industria y la población.



En la actualidad, el Servicio Meteorológico Nacional de EE.UU. está integrando la polarización dual (que también permite el seguimiento de las precipitaciones durante huracanes y tormentas de nieve) en 160 radares Doppler de todo el país y espera completar su misión a mediados de 2013. En paralelo, la NOAA está formando a los meteorólogos para que aprendan a interpretar las nuevas imágenes. La Oficina de Predicción Meteorológica de Newport/Ciudad de Morehead, en Carolina del Norte, fue la primera en aplicar la técnica a un ciclón tropical cuando el huracán Irene se aproximaba al estado en 2011. En el transcurso de la tormenta, los radares de polarización dual resultaron más exactos en el cálculo de la tasa de precipitación —y, por tanto, en la predicción de inundaciones— que los radares clásicos ubicados más al norte. Sin duda, los nuevos dispositivos lograron salvar vidas en ambos estados de Carolina. Más al norte, donde no se aplicó dicha técnica, el huracán Irene provocó daños más graves, a pesar de las advertencias, y causó la muerte de 30 personas.

Pam Heinselman, meteoróloga de la NOAA, asegura que los pronósticos meteorológicos también podrían mejorar si se implantara una técnica de radar avanzada que aplica la Armada de EE.UU. para detectar y controlar la posición de misiles y barcos enemigos. Heinselman dirige un equipo de investigación formado por ingenieros eléctricos, meteorólogos y sociólogos en el Banco Nacional de Pruebas de Radares Meteorológicos en Norman (Oklahoma) que se centra en esa técnica, los «radares de antenas en fase».

Los actuales radares Doppler disponen de una antena parabólica giratoria que realiza barridos sucesivos bajo distintos ángulos de elevación. Tras completar un giro de 360º, la antena se inclina hacia arriba para barrer otra pequeña porción de la atmósfera. Una vez terminado el muestreo desde cada ángulo, lo que en condiciones meteorológicas graves equivale a 14 giros, el radar regresa a su posición inferior y comienza de nuevo el proceso. Un radar Doppler tarda de cuatro a seis minutos en examinar por completo la atmósfera.

Por el contrario, los radares de antenas en fase emiten más de un pulso a la vez, de modo que se suprime la necesidad de inclinar las antenas; en consecuencia, el tiempo que tarda en explorar la atmósfera durante una tormenta se reduce a un minuto. El avance ayudará a identificar con rapidez posibles cambios en la circulación interna de una tormenta y, en última instancia, detectar con mayor antelación las situaciones que pudieran dar

origen a un tornado. El equipo de Heinselman ha demostrado que un radar de antenas en fase puede además suministrar ciertos datos de los que hoy todavía no se dispone, como los cambios rápidos en los campos de vientos, que pueden preceder a variaciones bruscas en la intensidad de una tormenta.

Heinselman y otros estiman que el simple uso de antenas en fase podría ampliar el tiempo de emisión de los avisos de tornado en más de 18 minutos, aunque todavía hay que perfeccionar el método. Idealmente, los sistemas de antenas en fase contarán con cuatro paneles que emitirán y recibirán ondas de radio y ofrecerán una visión de la atmósfera de 360º (cada panel estará orientado hacia un sector concreto: norte, sur, este y oeste). Por el momento, los meteorólogos de Norman han habilitado sistemas de un solo panel para la vigilancia meteorológica, y todavía deberá transcurrir al menos una década antes de que las antenas en fase se extiendan por todo el país.

A VISTA DE PÁJARO

Evidentemente, ni los mejores radares pueden barrer aquellas secciones del cielo que quedan al otro lado de una montaña o mar adentro en los océanos, donde se originan los huracanes. En esos casos se recurre a los satélites, también utilizados para obtener datos que complementen la información local proporcionada por un radar. Los satélites meteorológicos de la NOAA facilitan más del 90 por ciento de los datos en los que se basan las predicciones diarias y a largo plazo. Resultan imprescindibles para dar alertas de condiciones meteorológicas extremas con varios días de antelación. A fin de mejorar los resultados de tan valiosa información, la NOAA pretende habilitar una serie de nuevas técnicas en los próximos cinco años.

Si no aumenta el detalle de observación de los satélites, la predicción del tiempo a más largo plazo (sobre todo en el caso de eventos catastróficos como los huracanes) se verá notablemente restringida. La vigilancia meteorológica requiere dos tipos de satélite: geoestacionarios y polares. Los primeros se mantienen en una posición fija a unos 35.000 kilómetros de altura y transmiten imágenes casi continuas de la superficie terrestre. Gracias a las fotografías que suministran cada 15 minutos, se pueden seguir las tormentas que crecen con rapidez o detectar cambios en los huracanes (aunque no en los tornados).

Los satélites polares, que orbitan alrededor de la Tierra pasando por los polos a una altitud de unos 830 kilómetros, registran datos más precisos de temperatura y humedad en diferentes capas de la atmósfera. Estos satélites de órbita baja (LEO, por sus siglas en inglés) se distribuyen en una red que obtiene información de todo el planeta cada 12 horas.

A lo largo del presente decenio, la NOAA planea lanzar una nueva serie de satélites LEO, el Sistema Conjunto de Satélites

CIENCIA Y SOCIEDAD

Una alarma eficaz

En mayo de 2011, la ciudad de Joplin, en Missouri, fue asolada por una serie de tornados de tal virulencia que causó numerosas víctimas mortales. El número de fallecidos se hubiera reducido si una mayor parte de la población hubiera hallado antes un lugar donde ponerse a salvo. La socióloga de la NOAA, Vankita Brown, colaboró con los equipos de investigación del Servicio Nacional de Meteorología para analizar las medidas que se podrían haber tomado para lograr una respuesta más adecuada de la población. Sus investigaciones concluyeron que muchos habitantes no reaccionaron enseguida al oír la primera sirena o alarma de tornado, sino que esperaron hasta recibir la confirmación de otras fuentes, como las amistades. Otras personas simplemente no dieron al aviso la suficiente importancia.

Según Brown, la población suele pensar que nunca se verá afectada por eventos catastróficos infrecuentes, como tornados y huracanes. Pero tal percepción de seguridad cambia justo después de un desastre. Fue en ese contexto, tras el tornado de Joplin, cuando la NOAA hizo un llamamiento al diálogo nacional con el objetivo de construir un país que estuviera preparado ante las catástrofes meteorológicas.

Las conclusiones de los encuentros científicos destacan una serie de pasos a seguir para persuadir a la población de que actúe ante las alarmas. Los meteorólogos que aparecen en la radio y la televisión pueden mostrar la localización exacta de una tormenta que está a punto de desatarse. Dado que es más probable que una persona reaccione si ve actuar a otros miembros de su familia o a sus amigos, aquellos que se están preparando ante una tormenta pueden utilizar Facebook o Twitter para motivar a otros. Por su parte, la NOAA puede incentivar la reacción actualizando sus propias páginas de Facebook y Twitter —método en fase de prueba— y destacando las alertas en Google Maps. La Agencia Federal de Gestión de Emergencias y la Comisión Federal de Comunicación también han comenzado a enviar mensajes desde cada estación de radio base a cada teléfono móvil que se halle a su alcance. Dichas medidas, junto con una mayor antelación en los avisos, podrían minimizar la tragedia.

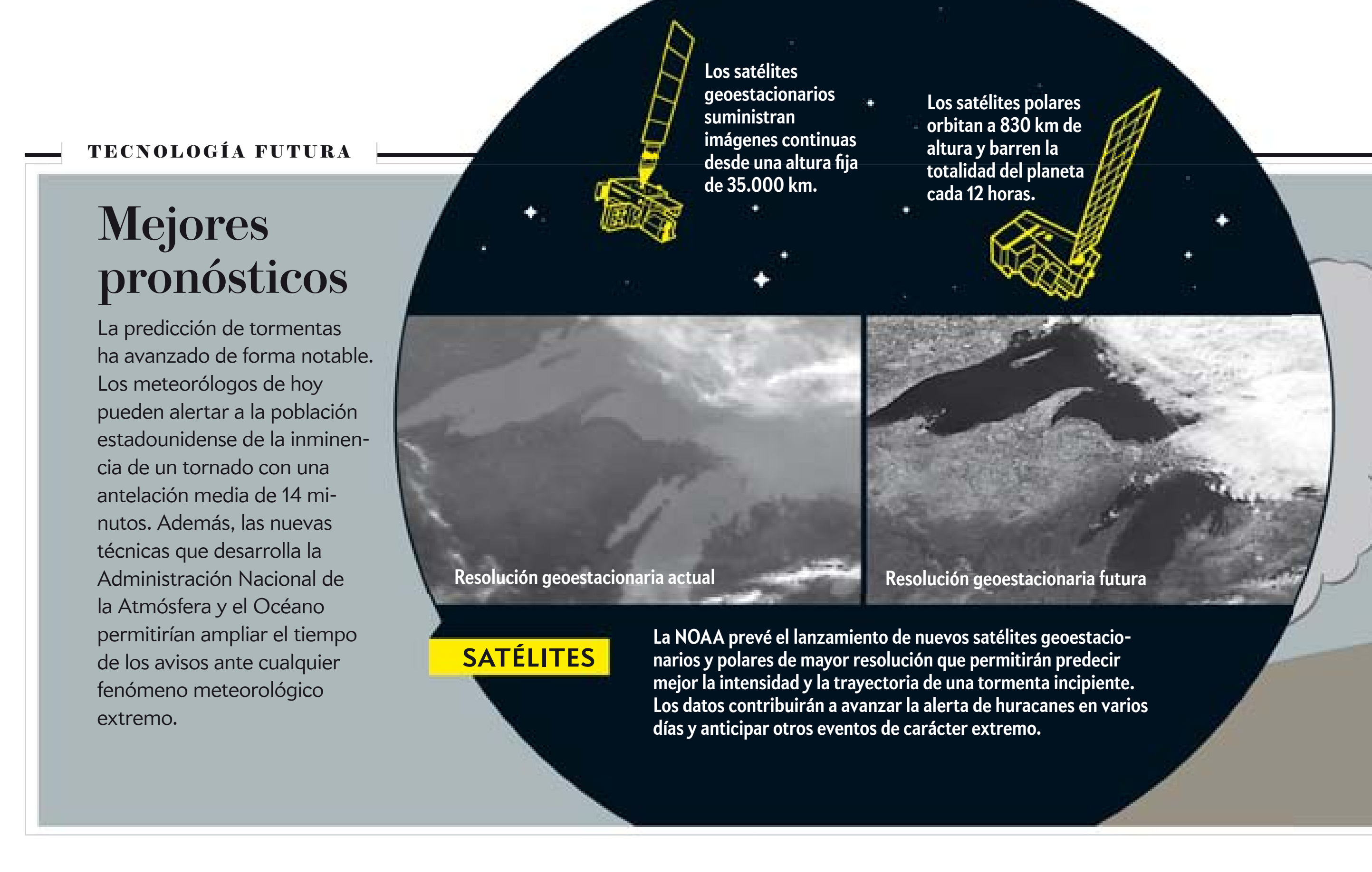

Joplin (Missouri), agosto de 2009


Tras el tornado de mayo de 2011

AP PHOTO/FOTOGRAFÍAS AÉREAS CORTESÍA DE M. J. HARDEN, COMPAÑÍA GEOEYE

Mejores pronósticos

La predicción de tormentas ha avanzado de forma notable. Los meteorólogos de hoy pueden alertar a la población estadounidense de la inminencia de un tornado con una antelación media de 14 minutos. Además, las nuevas técnicas que desarrolla la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano permitirían ampliar el tiempo de los avisos ante cualquier fenómeno meteorológico extremo.



Polares, que dispondrán de un equipo informático actualizado y de los instrumentos más avanzados. Los datos que proporcionen se introducirán en modelos computacionales para mejorar la predicción de algunos parámetros, como la intensidad y la trayectoria de los huracanes, y la previsión de tormentas intensas e inundaciones. Los nuevos sensores de microondas e infrarrojos mejorarán la calidad de los datos tridimensionales relativos a la temperatura, presión y humedad de la atmósfera, variables de especial relevancia si se tiene en cuenta que los cambios rápidos de temperatura y humedad combinados con bajas presiones indican una tormenta fuerte. Los sensores de infrarrojos obtienen datos sobre dichos parámetros en áreas sin nubosidad, mientras que los de microondas pueden hacerlo a pesar de la existencia de nubes.

En abril de 2011, cinco días antes de que un intenso sistema de tormentas se abriera paso por seis estados, los datos de los actuales satélites polares de la NOAA se incorporaron en los modelos; el consiguiente resultado permitió al Centro de Predicción de Tormentas de la NOAA prever un «tornado de posibles dimensiones históricas». La medianoche anterior al evento, el centro le adjudicó el máximo nivel de riesgo. Tal nivel se reserva a los casos más extremos en los que la incertidumbre es mínima y se detecta la posibilidad de una tormenta explosiva. Los nuevos satélites LEO deberían permitir dichas predicciones hasta cinco o siete días antes de una tormenta.

También se realizarán mejoras en los satélites geoestacionarios. En la serie de satélites GOES-R que se lanzará en 2015 se incorporarán instrumentos muy modernos que obtendrán fotografías de la Tierra cada cinco minutos tanto en longitudes de onda del espectro visible como en el infrarrojo. Gracias a ello, la frecuencia de las observaciones aumentará de 15 a 5 minutos, o menos, con lo que se podrán advertir las tormentas fuertes que se intensifican en poco tiempo. Además, los satélites GOES-R ofrecerán las primeras imágenes espaciales de rayos en el hemisferio occidental. Mediante un generador de mapas de rayos se detectarán cambios en la frecuencia de las descargas entre las nubes o entre las nubes y la tierra. Los estudios apuntan que tales variaciones tienen lugar 20 minutos, o más, antes de la formación de granizo, vientos fuertes o incluso tornados.

MILLONES DE DATOS

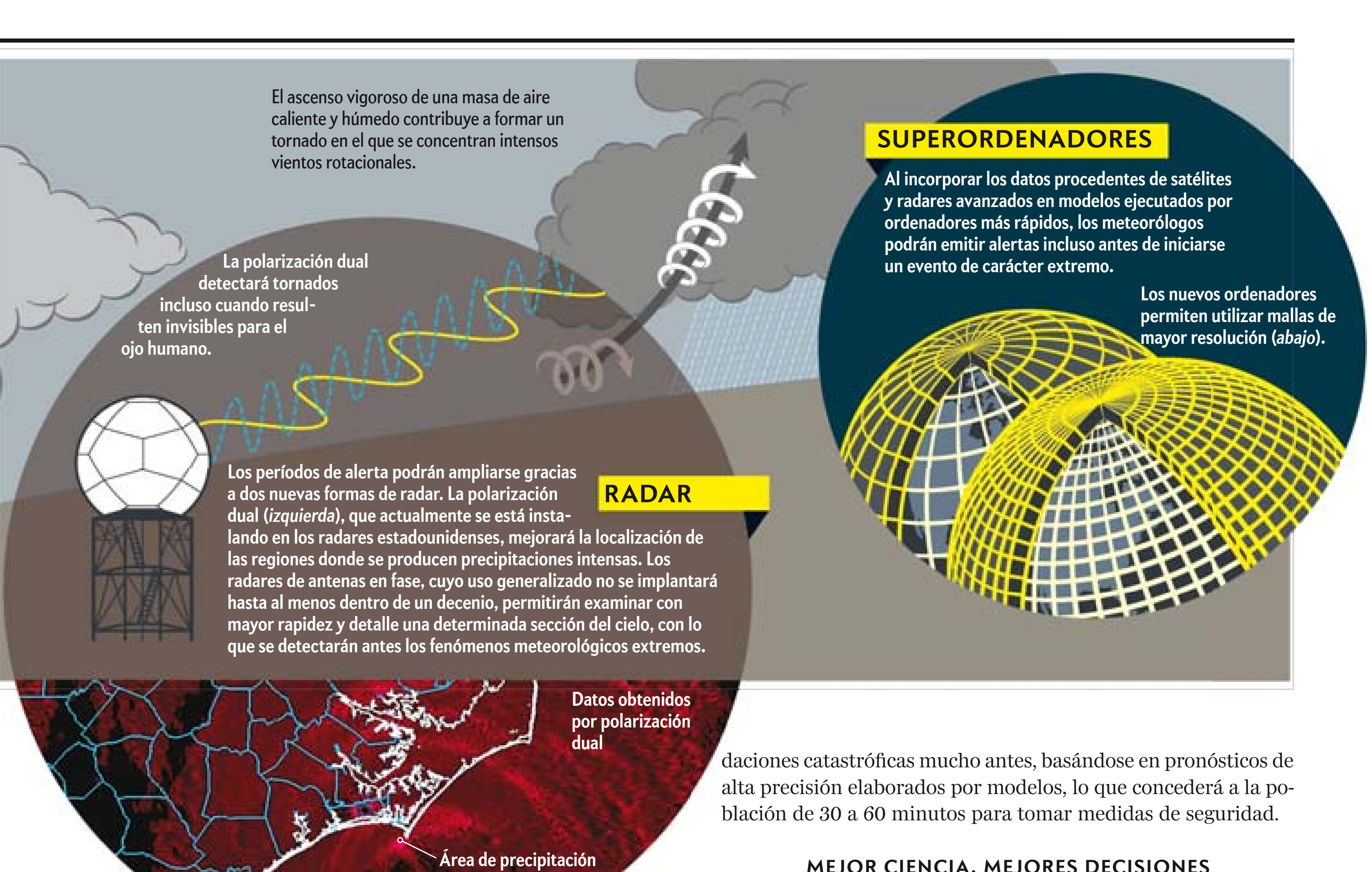
Las nuevas técnicas implementadas en radares y satélites contribuirán a adelantar varios minutos la emisión de advertencias. Pero si se introdujeran los datos en los modelos informáticos de predicción meteorológica se podría ganar incluso más tiempo. Los avisos de tornado, por ejemplo, podrían darse con una hora de antelación. La situación en Joplin habría cambiado por completo de haber contado con un plazo de tiempo similar.

Los modelos de predicción se basan en las leyes físicas que gobiernan la dinámica atmosférica, las reacciones químicas y otros procesos interdependientes. Para funcionar necesitan incorporar millones de cifras que describen las variables relacionadas con las condiciones meteorológicas y ambientales, como la temperatura, la presión o el viento. Imaginemos una malla sobre la superficie terrestre; situemos otra unos cien metros por encima de la primera, y así sucesivamente hasta alcanzar el límite superior de la estratosfera, a unos 50 kilómetros de altitud. Se requieren millones de líneas de código para traducir los miles de millones de puntos de malla en observación.

En la actualidad, un modelo clásico de predicción meteorológica utiliza mallas divididas en cuadrados de unos 15 a 80 kilómetros cuadrados. Cuanto más pequeños son los cuadrados, mayor es la resolución del modelo y más precisa la detección de aquellos cambios atmosféricos a pequeña escala que puedan desatar tormentas. Sin embargo, el procesado de un número creciente de datos exige superordenadores más rápidos.

Para mejorar los modelos se necesitan además científicos que sepan integrar e interpretar todos los datos. Bill Lapenta, director del Centro de Modelización Ambiental de la NOAA, dirige dicha labor y genera continuas predicciones numéricas con antelaciones de 12, 24, 36, 48 y 72 horas y más. Los meteorólogos contrastan los modelos de la NOAA con los de otros centros

CORTESÍA DE NOAA (*mapas*); JAMESON SIMPSON (*ilustraciones*)



internacionales para elaborar la predicción que aparece en Internet o en el telediario.

Los superordenadores de la NOAA en Fairmont (Virginia Occidental) procesan 71,3 billones de cálculos por segundo. Sin embargo, Lapenta estima que pueden alcanzarse velocidades superiores que permitan aplicar los modelos a escalas todavía menores. Por ejemplo, con una malla de 2,5 kilómetros cuadrados se simularían los procesos de pequeña escala que pudieran transformar un huracán o tormenta cotidiana en fenómenos catastróficos. La NOAA planea acceder a algunos de los últimos superordenadores del Observatorio Nacional de Oak Ridge para comenzar a diseñar modelos de este tipo. Lapenta espera que los modelos de alta resolución empiecen a funcionar en 2020.

También prevé que algún día en la próxima década, los nuevos radares y satélites de mayor capacidad convivirán con una generación de modelos meteorológicos de alta resolución, ejecutados a tiempo real por ordenadores cuyas velocidades superen el trillón de cálculos por segundo. Para hacerlos realidad, se están estudiando en profundidad las relaciones matemáticas, físicas y biogeoquímicas que deben codificarse para que el modelo funcione a la perfección.

Si las inversiones de la NOAA en este esfuerzo dan sus frutos, los meteorólogos ya no necesitarán esperar hasta obtener una imagen de radar para detectar una tormenta y emitir un aviso con 14 o 18 minutos de antelación. Por el contrario, podrán advertir sobre la inminencia de tornados, tormentas intensas e inundaciones catastróficas mucho antes, basándose en pronósticos de alta precisión elaborados por modelos, lo que concederá a la población de 30 a 60 minutos para tomar medidas de seguridad.

MEJOR CIENCIA, MEJORES DECISIONES

Gracias a todos esos progresos, los meteorólogos como Gary Conte, de la Oficina de Predicción Meteorológica de la Ciudad de Nueva York, podrán predecir con mayor precisión y antelación los eventos que pudieran paralizar la ciudad, como tormentas de nieve y hielo. Los fenómenos extremos podrán preverse con cinco días de tiempo, los huracanes con siete días, y la amenaza de inundaciones primaverales con semanas. Esta visión de una nación preparada contra las inclemencias del tiempo nace en el deseo de evitar los desastres que no fueron mitigados en 2011.

El objetivo es que en 2021 la ciudad de Joplin, reconstruida y en pleno desarrollo, reciba los avisos de tornado más de una hora antes de que sucedan. De ser así, las familias contarían con más tiempo para reunirse y resguardarse. Las residencias de ancianos y los hospitales podrían transferir residentes y pacientes a un lugar seguro. Los comerciantes tendrían tiempo para poner a salvo a sus trabajadores y cerrar sus negocios. Los teléfonos móviles recibirían mensajes de alarma para que las personas buscaran refugio y los meteorólogos emitirían alertas similares por televisión o radio. Las sirenas tocarían a rebato para reforzar la urgencia de los avisos. Como resultado, aun el tornado más feroz de la naturaleza atravesaría la ciudad sin cobrarse ni una sola vida.

PARA SABER MÁS

Centro de predicción de tormentas de la NOAA: **www.spc.noaa.gov**

Servicio meteorológico de la NOAA: **weather.gov**

Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special IPCC report. Dirigido por C. B. Field et al. Cambridge University Press, 2012. **ipcc-wg2.gov/SREX/**

ENERGÍA

Aprovechamiento energético del mar

Hoy, el agua genera más electricidad que cualquier otra fuente renovable. Pero además de las centrales hidroeléctricas tradicionales, aún queda un atractivo depósito por explorar: los océanos

Robert Gast





Robert Gast es físico y periodista científico.

La historia moderna del aprovechamiento de la energía marina comienza con el «pato de Salter»: una boya de plástico cuyos balanceos debían transformar en electricidad la energía mecánica de las olas. Motivado por la crisis del petróleo, el ingeniero de la Universidad de Edimburgo Stephen Salter diseñó el primer prototipo en 1974. Colocados en fila a lo largo de la costa, tales dispositivos asegurarían el suministro eléctrico del futuro: «Unos cientos de kilómetros bastarían para satisfacer las necesidades energéticas de Gran Bretaña», escribió entonces Salter en la revista *Nature*, una propuesta audaz en los albores de la época de las energías renovables. Pero el pato de Salter quedó en una declaración de intenciones. Superada la crisis del petróleo, el Parlamento británico retiró los fondos al proyecto en 1983.

Durante las décadas siguientes, la idea de aprovechar los océanos para producir electricidad desapareció del pensamiento colectivo, lo que quizás explique que hoy la aportación del agua al suministro energético solo provenga de ríos y embalses. En la actualidad, las centrales hidroeléctricas cubren en torno al 16 por ciento de la demanda mundial de electricidad, lo que las convierte en la principal fuente de energía renovable del planeta. La mayoría de las plantas se encuentran en China, Brasil, Estados Unidos, Canadá y Rusia. Algunas naciones confían casi por completo en la fuerza del agua: Noruega obtiene a partir de ella en torno al 99 por ciento de la electricidad; Suiza y Austria, más de la mitad.

Existen varias clases de centrales hidroeléctricas. En presas o embalses, la energía potencial del agua que cae desde una altura elevada se emplea para propulsar enormes turbinas. En los ríos, a menudo encontramos pequeñas construcciones que embalsan el cauce para obtener una caída de agua de algunos metros. Una opción en las corrientes fluviales menos caudalosas la proporcionan las minicentrales a filo de agua, en las que parte del agua se desvía y se hace pasar por turbinas generadoras.

De entre todos los medios de producción de energía a partir de fuentes renovables, la generación hidráulica se revela como la más eficiente de todas: más del 90 por ciento de la energía cinética del agua que atraviesa las turbinas puede con-

La instalación undimotriz Pelamis, una serpiente marina metálica de 180 metros de longitud, en las inmediaciones de la costa portuguesa. Este modelo genera energía a partir de unas bombas de émbolo situadas en las articulaciones.

PELAMIS WAVE POWER LTD.

EN SÍNTESIS

La energía hidroeléctrica es la más consolidada de todas las renovables: hoy por hoy, cubre el 16 por ciento de la demanda energética mundial. Cuenta con grandes posibilidades de ampliación, sobre todo en ciertas regiones de Asia y África.

Los océanos constituyen una reserva de energía hidráulica completamente inexplorada. Se calcula que las instalaciones de energía undimotriz y mareomotriz podrían cubrir un 10 por ciento de la demanda mundial de electricidad.

La técnica necesaria para alcanzar dicho objetivo se encuentra aún en sus inicios. Los últimos años han visto aparecer docenas de prototipos, pero aún está por ver cuáles de ellos derivarán en sistemas económicamente viables.

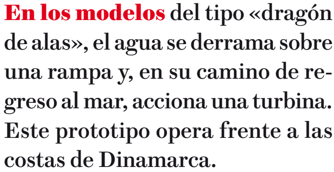
vertirse en electricidad. En un estudio de mayo de 2011, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático calculaba que la producción mundial de energía hidráulica podría multiplicarse por cuatro. De una parte, ese potencial reside en las 45.000 grandes presas que existen en el mundo: hoy, apenas una cuarta parte se emplea para producir electricidad. El resto de destina al control de avenidas fluviales, a fines agrícolas o al suministro de agua. Según el Consejo Mundial de la Energía, en la mayoría de ellas podrían instalarse centrales hidroeléctricas, sobre todo en África, Latinoamérica y Asia, donde existen varias localizaciones aún sin aprovechar por falta de inversores.

Sin embargo, las grandes presas hidráulicas suelen ejercer un impacto considerable sobre el ecosistema y, a menudo, exigen realojar a miles de personas. Tampoco resultan tan inocuas en lo que a las emisiones de gases de efecto invernadero se refiere. Ello se debe, entre otras razones, a que los embalses liberan grandes cantidades de metano: las bacterias provocan la fermentación de la materia orgánica depositada en el fondo y, después, ese gas asciende a la superficie. También la caída del agua a través de las turbinas libera metano a la atmósfera. Existe cierta controversia sobre la contribución real de los embalses a las emisiones de efecto invernadero. Un artículo reciente publicado en *Nature Geoscience* sostenía que esta podría ser menor de lo que se pensaba. Las presas emplazadas en las regiones tropicales serían las más afectadas por el fenómeno.

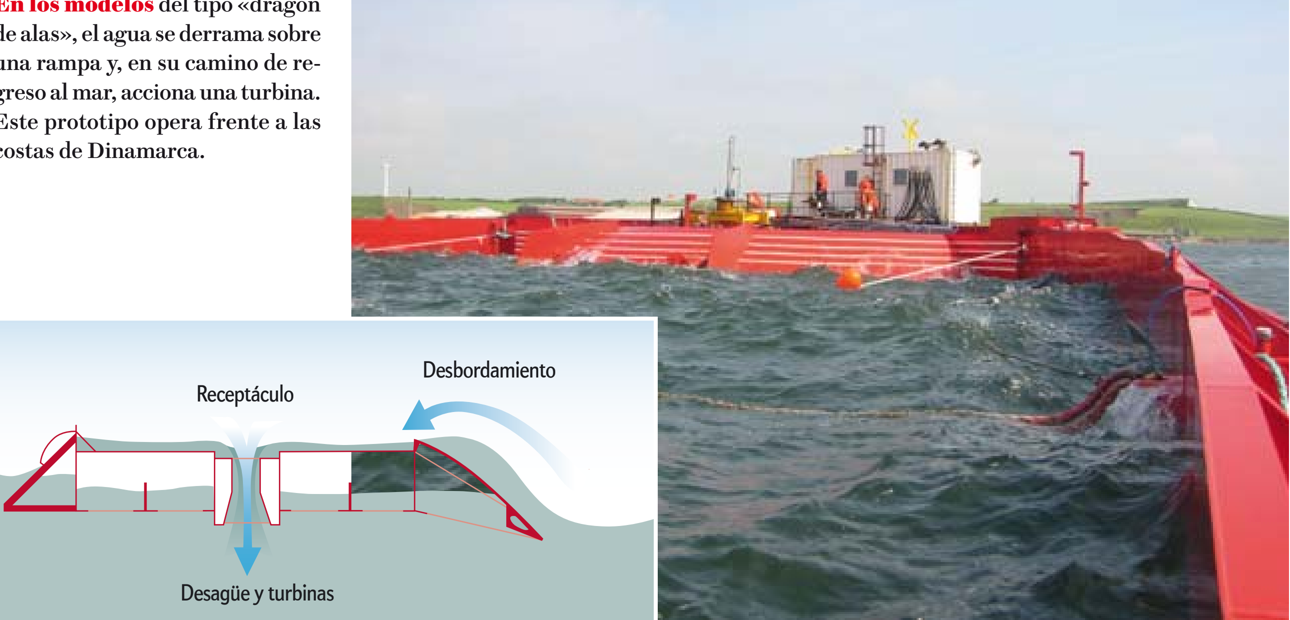
Los fríos embalses europeos apenas se ven concernidos por tales consideraciones, puesto que casi todos los emplazamientos aprovechables han sido explotados ya. Casi cualquier ampliación de la energía hidráulica en el continente pasa por renovar las instalaciones y dotarlas de recursos más modernos. Según datos de la Comisión Europea, ese potencial asciende a unos 54.000 gigavatios hora al año, en su mayor parte en el este de Europa. A efectos comparativos, téngase en cuenta que solo Alemania ya consume 600.000 gigavatios hora al año. Una modernización de las centrales hidroeléctricas del país podría aportar unos 3500 gigavatios hora anuales, bastante para abastecer a 200.000 hogares. En principio, sería posible construir anexos en la mayoría de las 7500 minicentrales con una capacidad inferior al megavatio, así como en algunas de las 353 centrales hidráulicas de gran tamaño. Durante los últimos años, las minicentrales se han beneficiado de una política de incentivos. En 2009, el Gobierno del país aumentó hasta los 12,67 céntimos por kilovatio hora la remuneración del suministro procedente de este tipo de instalaciones.

Las mejoras técnicas desempeñan un papel importante. Las turbinas optimizadas mediante simulaciones por ordenador rinden hasta un 5 por ciento más que los dispositivos antiguos. En comparación con los generadores de las centrales que comenzaron a operar en los años cincuenta, algunas mejoras incrementan la eficiencia hasta en un 11 por ciento. Sin embargo, obtener la máxima potencia no constituye el único objetivo. Hoy se desarrollan turbinas cuyo rendimiento se ve reducido en algunos puntos porcentuales a cambio de dejar sobrevivir a la mayoría de los peces que atraviesan la instalación. Este aspecto se ha convertido en un criterio económico: desde el año pasado, en Alemania solo pueden construirse centrales hidroeléctricas que adopten medidas para proteger la fauna fluvial y que, además, garanticen de manera permanente unas reservas mínimas de agua.

Sin embargo, nadie prevé que la energía hidráulica desempeñe un papel predominante en la producción futura a partir de fuentes renovables. En un documento alemán de junio de 2011 que esboza la ampliación de energías renovables hasta 2050, la energía hidráulica solo aparece en un sitio: a medio plazo, deben explorarse las ubicaciones aptas para el emplazamiento de centrales de hidrobombeo, destinadas a acumular los excedentes de la producción solar y eólica [*véase* «Centrales reversibles de muro circular», por Matthias Popp, *en este mismo número*]. Hoy existen en Alemania 34 plantas de este tipo, con una capacidad de almacenamiento de hasta 40 gigavatios hora. Sus posibilidades de ampliación se antojan más bien escasas, debido sobre todo a la falta de ubicaciones disponibles y a los conflictos ambientales que se derivan de este tipo de construcciones. La situación se presenta mucho más propicia en Escandinavia. Si se aprovechasen los lagos de montaña de Suecia y



En los modelos del tipo «dragón de alas», el agua se derrama sobre una rampa y, en su camino de regreso al mar, acciona una turbina. Este prototipo opera frente a las costas de Dinamarca.



WAVE DRAGON APS (*fotografía*); *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT* Y BUSKE-GRAFIK, SEGÚN WAVE DRAGON APS (*esquema*)

Noruega, la capacidad de almacenamiento podría aumentar hasta los 120.000 gigavatios hora. El potencial existente en Austria y Suiza se calcula en una cuarta parte de dicha cifra.

LA PROMESA DEL OCÉANO

Aunque hasta ahora las naciones con una orografía modesta no podían beneficiarse de la energía hidráulica, puede que esa situación cambie pronto: el pato de Salter —o al menos, sus descendientes— vuelve a estar en boca de todos. Hoy, más de un centenar de proyectos europeos estudian las posibilidades que el océano ofrece para generar electricidad [*véase* «Aprovechar el oleaje», por G. Iglesias Rodríguez; Investigación y Ciencia, octubre de 2011].

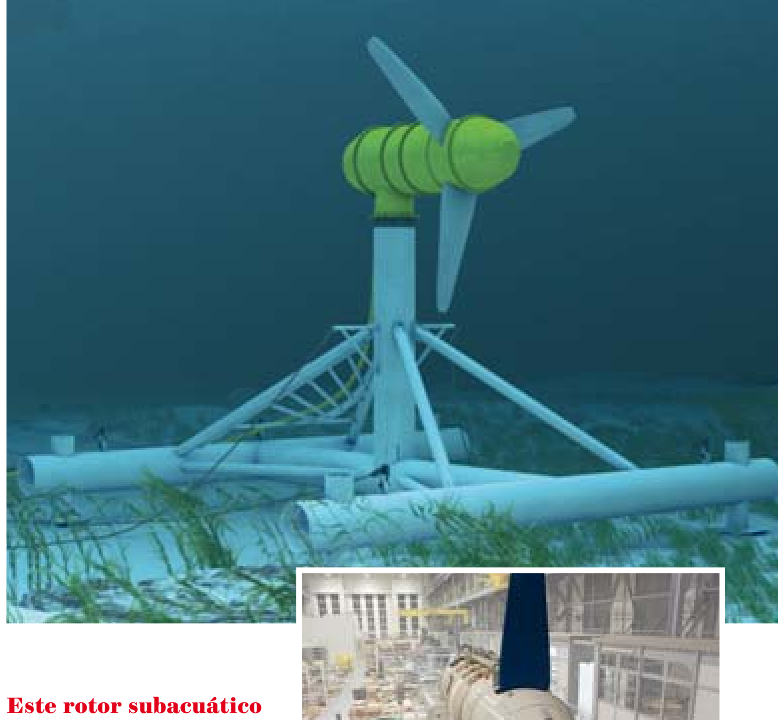
Las olas transportan docenas de kilovatios por cada metro de línea de costa. En comparación, la radiación solar por metro cuadrado de suelo en un día despejado rinde una potencia de un kilovatio. Por supuesto, también la energía de las olas procede en última instancia del sol. Este calienta la atmósfera en mayor o menor grado en regiones diferentes, lo cual da lugar a los vientos que agitan la superficie del océano. Esas ondulaciones se extienden cientos de metros y, en aguas profundas, casi no disipan energía, razón por la que llegan a la costa aun cuando no sopla viento. Las regiones localizadas entre 30 y 60 grados de latitud son las que gozan de mayor oleaje. Por supuesto, solo una parte de esta reserva energética se presta a la generación de electricidad: las centrales undimotrices han de operar en regiones costeras con un oleaje intenso y, además, solo una fracción de la energía mecánica de las olas puede transformarse en electricidad. Pero, a pesar de tales limitaciones, algunas estimaciones calculan que hasta un 10 por ciento de la demanda energética mundial podría obtenerse en el mar.

Hace unos diez años, ese objetivo llevó a Frank Neumann a instalarse en Portugal, por aquel entonces la «meca de la energía marina», en palabras del ingeniero. En 2003 se incorporó al Centro para la Energía Undimotriz (WavEC) de Lisboa, una institución dedicada a tender puentes entre la ciencia y la industria para que la energía undimotriz se convierta en realidad lo antes posible. Según Neumann, la explotación de la energía marina sufre décadas de retraso con respecto a otras técnicas, como la generación fotovoltaica o con biomasa: «Aún estamos examinando su viabilidad técnica».

Neumann conoce de primera mano lo que ello implica, ya que fue el encargado de poner en marcha una de las primeras instalaciones de energía undimotriz, levantada hace seis años por WavEC. En la orilla de la isla de Pico, en el archipiélago de las Azores, un grupo de la Universidad Técnica de Lisboa había comenzado a construir una central en 1995. Esta debía operar de acuerdo con el principio de la columna de agua oscilante, basado en una turbina que no es propulsada por una corriente de agua, sino por el flujo de aire que se forma cuando las olas penetran en una cámara abierta al mar y comprimen el aire que se encuentra en su interior.

Pero la instalación insular hubo de vérselas con defectos de fabricación. Los cimientos de acero se tambaleaban y la cámara de presión se encontraba perforada. «En el proyecto había científicos, pero ningún ingeniero», explica Neumann. Él y uno de sus colaboradores necesitaron años para eliminar esas deficiencias. Con todo, a finales de 2010 sus esfuerzos comenzaron a rendir frutos: durante el último trimestre de ese año, la central de Pico suministró energía a la red casi sin interrupción. Aunque su potencia se vio reducida a 50 de los 400 kilovatios para los que había sido diseñada, sirvió al menos para demos-

VOITH HYDRO



Este rotor subacuático ha sido instalado en la costa meridional de Corea del Sur. Fue construido por la empresa alemana Voith Hydro (*derecha*).

trar que los problemas de la energía undimotriz pueden resolverse con dinero y esfuerzo. Ahora Pico vuelve a necesitar financiación, ya que hace algunos meses se averiaron los dispositivos electrónicos de control. Desde 2008, sin embargo, nadie sufraga reparaciones: «Tanto las constructoras como las generadoras se muestran reticentes a invertir en el sector», admite Neumann.

SERPIENTES MARINAS

Es posible que en Portugal esos temores se deban a unas expectativas desmesuradas. El país aspiraba a convertirse en un líder mundial en el sector de la energía marina. Hace tan solo cuatro años, el Gobierno portugués abogó por ampliar esta forma de generación de energía en el plazo de pocos años, lo suficiente como para cumplir con el objetivo de producir el 45 por ciento de la demanda energética del país a partir de fuentes renovables. Una bonificación de 32 céntimos por kilovatio hora habría de proporcionar el estímulo necesario.

El que estaba llamado a convertirse en el proyecto estrella de la energía marina portuguesa se levantó a unos cinco kilómetros de Póvoa de Varzim, al norte del país. La instalación Pelamis, similar a una gran serpiente marina de 180 metros de longitud, constaba de cinco segmentos alineados en la dirección de la cresta de las olas. Sus articulaciones se doblarían por acción del oleaje y, gracias a un conjunto de bombas de pistones y un sistema hidráulico, generarían una potencia de 750 kilovatios. Sin embargo, el proyecto de un parque marino de 8,5 millones de euros y tres serpientes fracasó en 2009. La instalación se averió en varias ocasiones y, al cabo de un tiempo, el principal inversor, la australiana Babcock & Brown, se declaró en quiebra. Ya con anterioridad se habían sufrido retrasos considerables, debido, entre otros motivos, a los problemas para conectar la instalación flotante con una línea eléctrica submarina. «Las empresas del sector realizaron promesas exageradas para captar inversores y aquellos con poder de decisión creyeron en ellas», recuerda Neu-



«La energía marina es aún una aventura»

Kai-Uwe Graw, profesor de hidromecánica técnica de la Universidad Técnica de Dresde, investiga desde hace veinte años las posibilidades de la energía undimotriz

Entrevista realizada por Robert Gast

¿Cree que las olas bastarán para cubrir una décima parte de la demanda mundial de energía?

Absolutamente. Hace más de veinte años que intentamos aprovechar esta reserva y hemos de ver cuánto queda por explorar. En teoría, podrían instalarse centrales undimotrices incluso en la Antártida, aunque entonces necesitaríamos un método para transportar la electricidad hasta el consumidor. Quizás algún día dispongamos de una técnica de almacenamiento, tal vez con hidrógeno, con la que podamos lograrlo. Pero eso es por ahora una utopía. En el Atlántico Norte los consumidores se encuentran relativamente cerca de la fuente de energía. Sin embargo, tampoco allí queda claro cuánta electricidad de origen undimotriz podrá suministrarse durante las próximas décadas a las redes de Noruega, Irlanda, Gran Bretaña, Portugal, Francia y España.

Desde un punto de vista económico, ¿podrá la energía marina competir en los decenios venideros con otras fuentes renovables, a pesar de la hostilidad del entorno natural en el que deben operar las centrales?

Si las instalaciones undimotrices recibiesen subvenciones equiparables a las que Alemania destina a la energía solar, hoy dispondríamos de un gran número de centrales. Pero, en toda Europa, las primas se hallan como mínimo un orden de magnitud por debajo de las que recibe la industria solar. Si se hubiese invertido en los océanos la cantidad de dinero que en los años ochenta se asignó a la energía nuclear, ya existirían centrales de energía marina. Puede que no aguantasen largo tiempo y que su rendimiento no fuese aún el óptimo. Pero, con una tasa elevada de beneficios, los inversores hubieran asumido el riesgo, ya que entonces las instalaciones se hubieran amortizado en algunos años. Ahora, para rentabilizar una central, esta debe resistir veinte años. Inversiones semejantes solo compensan a una empresa si antes o después se hace con el liderazgo del mercado, algo que nunca puede asegurarse con antelación.

¿Se encuentra la técnica realmente madura?

No. Todos los proyectos hoy en marcha adolecen de defectos y puntos débiles. Podemos compararlo a la fabricación de un automóvil. Quizá construyamos un modelo reducido que funcione bien, pero, al final, el vehículo de mayor tamaño sufrirá sus propios problemas, con independencia de todos los coches que hayamos fabricado hasta el momento. En el caso de la energía marina, antes no había nada. Por eso supone una aventura tecnológica. A menudo, los políticos dan por sentado que una inversión de capital realizada hoy rendirá beneficios pasado mañana. Esa idea no funciona en ningún ámbito.

¿Cuál considera mejor, la energía undimotriz o la mareomotriz?

La olas albergan sin duda un potencial mayor. Es cierto que contamos con más experiencia en el aprovechamiento de las mareas, pero la central mareomotriz de Saint-Malo ha influido muy negativamente en la imagen de esta técnica. Las repercusiones ambientales de la generación de energía a partir de las corrientes de marea, una técnica que se basta con rotores submarinos y que no requiere levantar ninguna presa, serán sustancialmente inferiores. Sin embargo, si se instalan demasiados rotores en el fondo marino, también habrá consecuencias para el entorno natural.

¿Existen ubicaciones viables para la energía marina en Alemania?

En la localidad de Hörnum, en Sylt [en la frontera con Dinamarca], la velocidad de la corriente debería bastar para alimentar una central mareomotriz. Incluso tendría sentido desde el punto de vista de la preservación de la costa, ya que la isla se desmorona poco a poco por acción de las corrientes marinas. Si se instalasen rotores en el estrecho se drenaría energía de la corriente, por lo que la tierra firme no se erosionaría con tanta rapidez. Aparte de esa posibilidad, no existen suficientes localizaciones en el mar del Norte para un sector industrial propio.

mann. Hoy el Gobierno portugués se muestra menos eufórico y la economía del país debe afrontar problemas más acuciantes. Según Neumann, la energía marina ha retrocedido muchos puestos.

La situación en Gran Bretaña es otra. Allí el Estado invirtió en 2009 más de 80 millones de libras en el desarrollo de técnicas para el aprovechamiento de la energía marina. Para 2020 deberían estar instalados unos 2000 megavatios, una potencia equivalente a la de dos centrales nucleares. En 2050, según un estudio de Carbon Trust Fund, hasta un quinto del suministro británico de electricidad podría provenir del mar.

La serpiente marina ha encontrado un nuevo hogar en las islas británicas. Pero, al contrario que el monstruo del lago Ness, Pelamis se deja ver sin problemas frente al archipiélago de las Orcadas, en la costa septentrional de Escocia. En los últimos años se ha creado allí el mayor parque marino del mundo, que alberga en la actualidad cerca de una docena de proyectos en diferentes estadios de desarrollo. En los últimos dos años, dos prototipos de la instalación Pelamis se han hecho a la mar. A ellos deberían sumarse otros 66 antes del final del decenio. Para entonces, las serpientes marinas podrían suministrar a la red un total de 50 megavatios. Se trata de uno de los pocos proyectos de energía marina que ha logrado atraer a una multinacional: bajo el patrocinio de la alemana E.ON y la británica ScottishPower Renewables, ambos prototipos deberán mostrar su capacidad para sobrevivir a las inclementes olas que azotan la costa escocesa durante los meses de invierno, considerados hasta ahora el obstáculo principal para este tipo de instalaciones.

Por lo demás, no faltan ideas originales para subyugar al mar de las islas Orcadas. Una construcción similar a la valva de un molusco de enormes proporciones transformará el movimiento oscilante de una boya en energía hidráulica. La inversión corre a cargo del gigante suizo de la electrónica ABB. Una empresa finlandesa proyecta anclar un casco con forma de pingüino y 1600 toneladas de peso; debido a su peculiar forma, las olas le imprimen un movimiento de rotación que puede convertirse en hasta un megavatio de potencia eléctrica. Otra compañía pretende instalar a partir de este año varias boyas cuyo movimiento bascular propulsará bombas en el fondo marino. Según la operadora, a partir del agua bombeada hacia la orilla, podría obtenerse además de electricidad agua potable, siempre y cuando se instale una planta desalinizadora.

Mientras tanto, un pequeño prototipo explora en Noruega un procedimiento que se rige por el principio inverso: en una planta de potencia osmótica, se aprovecha la presión que, a través de una membrana, el agua potable ejerce sobre el agua salada para propulsar una turbina. Desde hace un tiempo, en las regiones ecuatoriales se planea explotar la diferencia de temperatura existente entre el agua de la superficie y la del fondo marino para accionar un motor térmico. El grupo Lockheed Martin desea instalar en los años venideros una planta experimental en Hawái.

Un proyecto aún más llamativo podría ver la luz dentro de poco frente a la costa occidental de Gales. Allí, un «dragón de olas» de 300 metros de ancho y 33.000 toneladas de peso intentará domeñar las olas para abastecer a unos 3000 hogares. Un dispositivo unas 4,5 veces menor y financiado por inversores privados operó entre 2003 y 2009 en la bahía danesa de Nissum Bredning. En el prototipo, concebido para generar unos 20 kilovatios, el agua se derramaba por una rampa hacia el interior y en su camino de regreso al mar accionaba unas turbinas. Pero tampoco aquí faltaron los problemas, a pesar de que las aguas de la bahía danesa se tienen por mansas. En 2005, el dragón de prueba se soltó de sus amarras y derivó hacia la orilla. También sus «alas» se desprendieron en varias ocasio-



En el proyecto británico SeaGen, las palas dobles de cada torre se accionan gracias al flujo y reflujo de las mareas. En el inserto se muestra el prototipo Seaflow.

MARINE CURRENT TURBINES LTD.

nes a consecuencia de la marejada y las turbinas hubieron de vérselas con las algas y la corrosión. A pesar de ello, las deficiencias técnicas pudieron resolverse y el prototipo demostró su capacidad para generar energía, tal y como los ingenieros del proyecto refirieron en el informe final. Sin embargo, aún no ha aparecido ningún inversor interesado en resucitar al dragón frente a la costa de Gales.

«VEREMOS FRACASOS ESPECTACULARES»

Los expertos creen que muy pocos prototipos de energía undimotriz darán el salto necesario para integrarse en el mercado. «Muchos de ellos no se rentabilizarán o no operarán con la fiabilidad necesaria», escribió en 2010 Tom Thorpe, experto británico en energía marina, en un informe para el Consejo Mundial de la Energía. La conclusión se aplica a algunos de los proyectos que ya han encontrado inversores. «En los próximos años veremos algunos fracasos espectaculares», pronostica.

La culpa bien puede achacarse a la imprevisibilidad del océano. Entre otros factores, la energía de una ola aumenta con el cuadrado de su altura. De esta manera, si un parque se ancla en una región en la que por regla general las olas se levantan un metro, pero en la que una vez al año sobrevienen tempestades que las aúpan hasta los diez metros, las instalaciones deberán estar preparadas para soportar cargas cien veces mayores de lo habitual. Al contrario que las embarcaciones, que pueden dirigirse a puerto, o las plataformas petroleras, que se construyen a unos 30 metros sobre la superficie del mar, las instalaciones de energía undimotriz se hallan expuestas a toda la violencia de los elementos.

La compañía alemana de energía hidráulica Voith Hydro se enfrentó a tales dilemas cuando, hace unos años, discutía su entrada en el sector undimotriz. «Buscábamos una técnica con un riesgo muy bajo», relata Jochen Weilepp, directivo de la compañía. La hallaron en la isla de Islay, frente a la costa escocesa. Desde 2011, la compañía local Wavegen operaba allí con una pequeña central basada en el principio de la columna de agua oscilante, como la de la isla de Pico. Pero la instalación Limpet («lapa», en inglés) había hecho honor a su nombre: concebida para generar 500 kilovatios, hasta entonces solo había proporcionado menos del 5 por ciento de esa cifra debido a que el fondo marino se reveló mucho más llano de lo esperado. En consecuencia, llegaban a la instalación menos olas de las previstas.

Voith Hydro transformó Limpet en un parque de pruebas. En sus más de 70.000 horas de servicio se han ensayado y optimizado turbinas de varias clases. Esos ensayos han resultado de utilidad en la planificación de la central undimotriz de Motrico, en Guipúzcoa, puesta en marcha en verano de 2011. En el nuevo dique portuario del pueblo pesquero se integraron 16 turbinas de tamaño reducido y poco propensas a averías que, a pesar del moderado oleaje de la bahía, han operado hasta el momento de manera satisfactoria. De hecho, se espera que su rendimiento supere al de todas las instalaciones de columna de agua flotante previas. La central, de 300 kilovatios y con un coste estimado en 2,3 millones de euros, suministra electricidad a 600 de los 5000 habitantes del pueblo vasco.

El siguiente proyecto de ese tipo quizá se beneficie de turbinas mayores y de un oleaje más bravío, como el de la isla de Lewis, en la costa occidental de Escocia. Con una potencia prevista de 4 megavatios, la instalación de Siadar se emplazará mar adentro y su conexión con la orilla consistirá en un paso elevado de 200 metros de largo. Hasta hace un año todo parecía marchar bien: una filial del consorcio energético alemán RWE se hallaba dispuesta a reunir la mayor parte del capital necesario, estimado en unos 35 millones de euros. Sin embargo, en agosto de 2011 el gigante energético se retiró del proyecto, a pesar de que nada parecía amenazarlo. «Siadar fue la primera iniciativa de gran envergadura que obtuvo la autorización de los organismos escoceses», explica Weilepp.

APROVECHAR LAS MAREAS

De cara al futuro, la compañía alemana prefiere invertir en otra técnica: la energía mareomotriz, basada en el aprovechamiento de las mareas. Estas se muestran especialmente intensas en estrechos y bahías de ciertas regiones, como el Atlántico Norte o la costa occidental de Canadá. En Europa se calculan en 106 las ubicaciones prometedoras.

Una instalación de grandes dimensiones existe desde los años sesenta en la localidad bretona de Saint-Malo, donde las mareas mueven cada día más de 700.000 millones de litros en la desembocadura del río Rance. Allí, una presa de contención de 75 metros de ancho se emplea para accionar 24 turbinas, las cuales generan electricidad para 40.000 hogares. El potencial de la energía mareomotriz en Europa se limita a un 10 por ciento de lo que podría generarse gracias a las olas. Sin embargo, las mareas cuentan con una gran ventaja: sus corrientes son muy regulares y se dejan pronosticar con certeza. Incluso en el caso de marea viva, la velocidad del flujo de agua solo aumenta levemente. Y si sobreviene un incremento brusco de la corriente, la instalación puede detenerse, gracias a lo cual los riesgos de inversión disminuyen de manera considerable. «Las posibilidades de supervivencia de una instalación mareomotriz son mucho mayores que las de un parque undimotriz», explica Jochen Bard, experto de energía marina del Instituto Fraunhofer para la Energía Eólica y Técnica de Sistemas Energéticos de Kassel. Además, la previsibilidad de las mareas permite recurrir a otras instalaciones para asegurar el abastecimiento durante las interrupciones de la central.

Mar
Tierra firme
Columna de agua oscilante
Las olas insuflan aire en las turbinas

En la isla británica de Islay, las olas accionan las turbinas de la instalación de pruebas Limpet.

VOITH HYDRO

Bard participó en el proyecto piloto SeaGen, activo desde 2008 en el estrecho que media entre el Atlántico y el lago Strangford, en Irlanda. A diferencia de la instalación de Saint-Malo, allí no se ha levantado una presa, sino que se aprovechan las corrientes de marea. Estas accionan dos rotores de 16 metros que, unidos a una torre submarina de 40 metros de altura, rinden hasta 1,2 megavatios. También SeaGen sufrió incidencias técnicas en sus comienzos, como averías en los álabes de las turbinas, pero los principales problemas se superaron a tiempo. «Desde entonces, SeaGen opera de forma muy fiable», asegura Bard. Sin embargo, la situación puede llegar a complicarse sobremanera cuando algo no marcha como se esperaba, ya que para reparar los rotores es necesario llevarlos a la superficie. Un proyecto en Corea del Sur intentará minimizar los costes derivados de este tipo de situaciones con un parque de rotores subacuáticos sencillos pero robustos, que esperan que abastezca a 100.000 hogares. Las operadoras surcoreanas se hallan sujetas a especificaciones medioambientales menos estrictas que en la instalación mareomotriz británica SeaGen. En esta última, por ejemplo, se dispuso un sónar para detectar focas y detener la instalación cuando una de ellas se aproximase demasiado a los rotores. Asimismo, se realizaron estudios sobre la influencia de la central en la flora y fauna del fondo marino.

Las futuras instalaciones mareomotrices intentarán amortiguar al máximo el impacto ambiental que ejercen las presas como la de la central de Saint-Malo. Esta cuestión presidió el debate sobre la conveniencia de construir un parque de grandes dimensiones en la bahía del Severn, cerca de Bristol: en una presa de 16 kilómetros, 216 turbinas de enormes dimensiones aprovecharían la diferencia de altura de 14 metros que existe entre la bajamar y la pleamar para suministrar hasta un 5 por ciento de la demanda energética de Inglaterra. El año pasado, sin embargo, el Gobierno británico suspendió el proyecto. Los efectos de la presa sobre la fauna hubieran sido considerables y, además, un estudio relativo a la viabilidad del proyecto arrojó unos costes sorprendentemente altos, cifrados en un mínimo de 34.000 millones de libras.

El futuro de la energía marina parece depender, sobre todo, del dinero. Esta técnica aún ha de demostrar si podrá competir a largo plazo con otras renovables, como la generación eólica o la biomasa. Por el momento, los costes de inversión resultan muy elevados: diez millones de euros por megavatio de potencia instalada. Bard considera que, de aquí a unos diez años, el precio de los parques de grandes dimensiones podría reducirse en un tercio, lo que equipararía la explotación de los océanos a la energía eólica marina.

La competencia entre proyectos para atraer fondos espoleará el nacimiento de ideas que abaraten los costes. Al respecto, Bard augura un abanico de innovaciones: «Con la energía marina no ocurrirá lo mismo que con la eólica, donde el rotor de tres palas se ha impuesto a cualquier otra forma de afrontar el problema». Sin embargo, antes de poder medirse en el mercado, la energía marina debe aún superar varios obstáculos. «Para empezar, necesitamos una técnica que garantice la operación continua durante todo el invierno sin sufrir daños», concluye.

© Spektrum der Wissenschaft

PARA SABER MÁS

World energy council: Survey of energy resources. N. Barros et al. 2010.
Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. N. Barros et al. en *Nature Geoscience*, vol. 4, págs. 593-596, 2011.
100 Prozent erneuerbare Stromversorgung bis 2050: Klimaverträglich, sicher, bezahlbar. Consejo Asesor sobre Cuestiones Medioambienteles (SRU) de Alemania, mayo de 2010.
Special report on renewable energy sources and climate change mitigation. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, mayo de 2011.



Matthias Popp es ingeniero industrial y doctor en energías renovables por la Universidad Técnica de Braunschweig. Trabaja como ingeniero y consultor independiente en el ámbito de las energías renovables y el almacenamiento energético.



ENERGÍA

Centrales reversibles de muro circular

Una alternativa flexible y competitiva para almacenar los excedentes energéticos de la producción solar y eólica

Matthias Popp

En teoría, el sol y el viento bastarían para cubrir la demanda energética de todo el planeta. El problema reside en que ambas fuentes son «volátiles»: su tasa de producción queda a merced del tiempo atmosférico, por lo que resulta difícil ajustar la generación a la demanda. Sin embargo, un suministro estable requiere en todo momento un balance exacto entre producción y consumo. Para evitar daños o interrupciones en la red eléctrica, deberían almacenarse los excedentes de energía para poder emplearlos después, en momentos de déficit.

El almacenaje necesario para satisfacer de manera permanente la demanda se mide en cargas diarias. Una carga diaria constituye la cantidad de energía que debería acumularse para cubrir el consumo de una región durante un día, calculada a partir del promedio en ese lugar a largo plazo. Si se supone un escenario en el que los sistemas de suministro se basan de manera exclusiva en el viento y el sol, se comprueba que la demanda de almacenamiento depende en gran parte de la composición del parque de generación que transforma la energía de los ciclos naturales en electricidad.

En Alemania, la demanda de almacenamiento más elevada se daría en el caso de una red alimentada únicamente por generadores solares. Ese escenario requeriría más de cien cargas diarias, dado que en invierno la luz solar escasea y, al mismo tiempo, es durante la estación fría cuando más energía se consume. En el caso de una red de aerogeneradores, la demanda de almacenamiento necesaria dependería en gran parte de las características técnicas del sistema de producción. En momentos de vientos fuertes y huracanados llegan a alcanzarse potencias pico enormes; en consecuencia, los rotores se orientan según la dirección del viento para evitar la sobrecarga de las instalaciones. La potencia nominal de un aerogenerador queda determinada por la velocidad del viento a partir de la cual comienza esta reducción de la potencia. Cuanto más elevada sea dicha velocidad de ajuste, en menos ocasiones se llegará a la potencia nominal y más descenderá el grado de aprovechamiento de las instalaciones. En 2011, el conjunto de todos los aerogeneradores operativos en Alemania alcanzaron un grado de aprovechamiento promedio de en torno al 20 por ciento; el equivalente a unas 1750 de las 8760 horas que hay en un año.

Por tanto, para que el suministro eólico pudiese hacer frente a una parte esencial del suministro, la red eléctrica y los sistemas de almacenamiento tendrían que ser capaces de transportar y absorber una potencia cinco veces mayor que la que necesitan los consumidores. En los escenarios que hemos considerado en el Instituto de Tecnología Térmica y de Combusti-

EN SÍNTESIS

La falta de constancia de la generación solar y eólica exige emplear sistemas de almacenamiento energético a fin de acumular los excedentes de producción y emplearlos cuando lo exija la demanda.

En la actualidad, el hidrobombeo constituye uno de los métodos más eficientes que se conocen para almacenar energía. Sin embargo, no resulta fácil hallar localizaciones adecuadas para su instalación.

Una solución podría llegar de la mano de las centrales de muro circular. Estas operan como los sistemas de hidrobombeo, pero pueden construirse a medida según las características de cada terreno.

Tales parques de almacenamiento podrían resultar competitivos sin necesidad de ocupar más superficie que una presa de gran tamaño. En el mismo recinto podrían instalarse aerogeneradores y paneles solares.



Visiones para un futuro eólico y solar: La ilustración muestra una instalación híbrida de muralla circular con un diámetro de 6,6 kilómetros y una altura de 215 metros. Esta podría situarse en un lago, que serviría como cuenca inferior, y combinarse con aerogeneradores y paneles solares. La superficie ocupada por una instalación de estas características resultaría equiparable a la de las grandes minas de carbón, como la de Sokolov, en la República Checa (*fotografía*).

MATTHIAS POPP, GRAFIK/STEFAN SCHIESSL (*central reversible*); MATTHIAS POPP Y WOLFGANG SCHWARZ (*mina*)

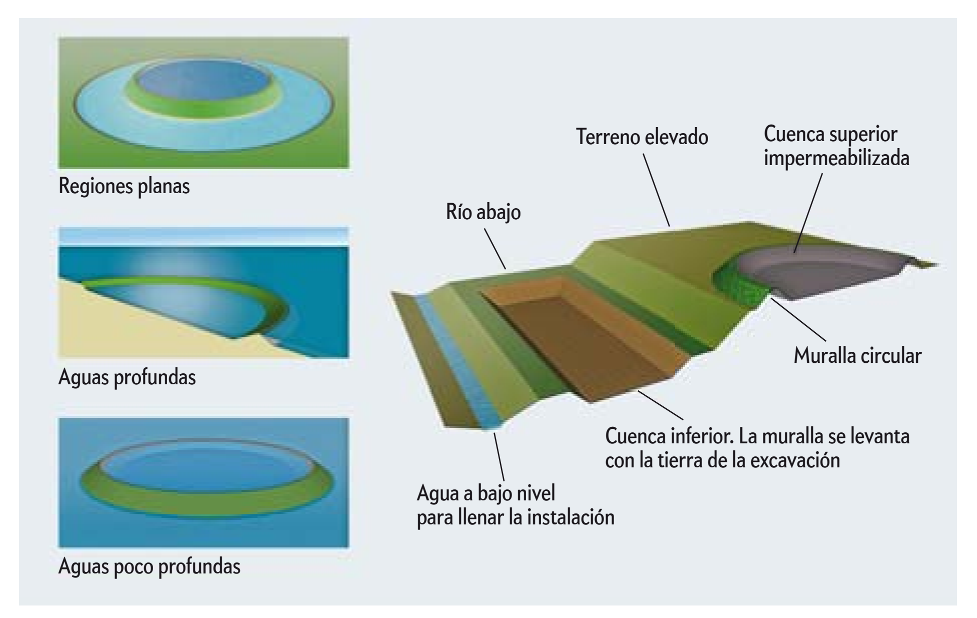
bles de la Universidad Politécnica de Braunschweig, analizamos también la manera en que un mayor grado de aprovechamiento de la energía eólica influiría en su ampliación futura. En el caso de un suministro basado exclusivamente en aerogeneradores cuya tasa de utilización rondase el 50 por ciento, la demanda de almacenaje ascendería a unas 40 cargas diarias. Ello se debe a que el viento sopla con gran fuerza durante la temporada invernal, por lo que los sistemas de almacenamiento podrían transferir los excedentes de producción correspondientes al verano; es decir, justo al contrario de lo que ocurre con la energía solar. Parece razonable, por tanto, pensar en una mezcla de generación que incluya ambas formas de producción de energía.

COMBINACIONES ÓPTIMAS

Si se coordinase la generación solar y la eólica entre las diferentes regiones alemanas, la demanda de almacenamiento del país podría verse reducida a unas 14 cargas diarias. Para ello, la cuota de producción de energía eólica debería llegar al 80 por ciento, mientras que del 20 por ciento restante se encargaría la generación solar. Este modelo optimizado no exigiría una instalación masiva de sistemas de almacenamiento. Su uso se vería concentrado, sobre todo, a los meses invernales. El resto del año, los dispositivos de acopio energético se encontrarían repletos. Su papel se limitaría a emplear una pequeña parte de su capacidad para equilibrar las breves diferencias entre producción y demanda.

Por su parte, las reservas de producción ejercen una influencia decisiva sobre la necesidad de almacenaje. Cuanta más potencia se encuentre disponible por encima del consumo promedio, tanto menos se vacían los almacenes y con mayor rapidez vuelven a llenarse después de una toma. En Alemania, con una combinación acertada de energía eólica y solar, unas reservas de producción del 80 por ciento podrían reducir la demanda de almacenaje a menos de diez cargas diarias.

Un factor a tener en cuenta es el relativo a la eficiencia del sistema de almacenamiento. Cuando las instalaciones gozan de un buen rendimiento, se reducen de manera notable las reservas de producción necesarias (el número de aerogeneradores e instalaciones fotovoltaicas que, además de los que cubren el consumo real, se requieren para compensar las pérdidas). En



¿Que se necesita para construir un depósito de muralla circular? La gráfica muestra las posibilidades sobre un terreno llano (*izquierda, arriba*), en aguas profundas o poco profundas (*izquierda, centro y abajo*) o en las inmediaciones de un río (*derecha*).

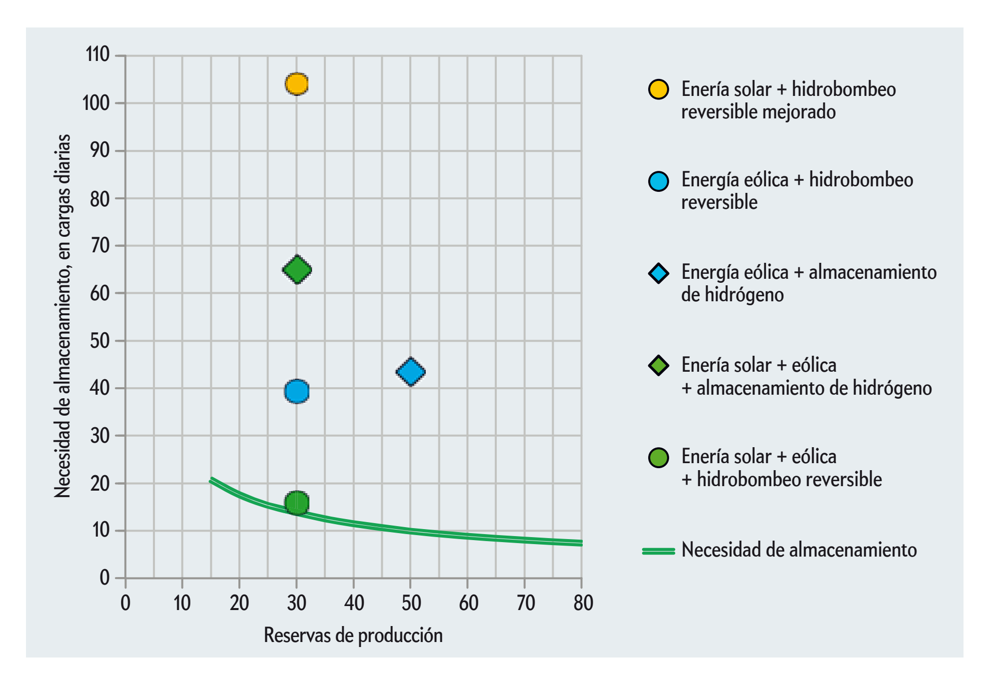
principio, las centrales hidráulicas reversibles permitirían disfrutar de una eficiencia del 80 por ciento y de una capacidad de almacenaje del orden de la que mencionábamos arriba. Sin embargo, y aun en los supuestos más favorables, la demanda de almacenamiento en Alemania resulta varios cientos de veces mayor que la que pueden aportar los sistemas de hidrobombeo disponibles en la actualidad. Por otro lado, las localizaciones adecuadas para ampliar el parque de centrales reversibles tradicionales son muy escasas.

ALMACENES FLEXIBLES

Una manera de sortear tales problemas consistiría en construir depósitos de muralla circular. Estos son sistemas de almacenamiento de agua en los que la cuenca elevada se compone de una muralla circular terraplenada, construida a partir de la tierra extraída de la cuenca inferior. Funcionan de igual manera que los almacenamientos hidroeléctricos reversibles tradicionales, pero gozan de la ventaja de que resulta más sencillo dar con ubicaciones propicias.

Las ventajas de los depósitos de muro circular son varias. A diferencia del hidrobombeo usual, los depósitos de muralla pueden evitar la inundación de grandes valles fluviales. Además, no necesitan ser levantados en zonas montañosas, ya que es la tierra extraída de la cuenca inferior la que se usa para crear la diferencia de altura entre uno y otro embalse. Con una muralla circular, pueden obtenerse desniveles adecuados en regiones llanas o aumentar los ya existentes sobre el terreno. Por último, con estas instalaciones sería posible obtener grandes capacidades de almacenamiento. En definitiva, podrían erigirse como una solución realista para hacer frente al problema del acopio energético en una red eléctrica que operase a partir de fuentes renovables.

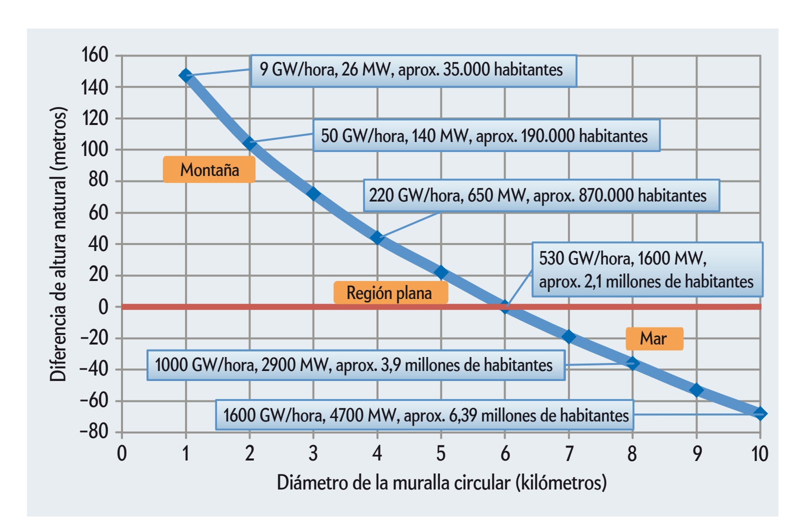
Para levantar un depósito de muralla circular, se excavaría primero la cuenca inferior, de manera semejante a cuando se procede a la denudación de las capas superiores en una mina a cielo abierto. Con la tierra extraída se construiría una muralla circular estable, el interior de la cual se impermeabilizaría y se conectaría con la cuenca inferior mediante tuberías de presión y generadores. Los excedentes de corriente se emplearían para alimentar los motores en la central, que, con ayuda de bombas, transportarían el agua desde la cuenca inferior hasta la supe-



¿Cuánta energía se necesita almacenar para un suministro cien por cien renovable? Los datos se corresponden con una eficiencia de almacenamiento del 80 por ciento en el caso del hidrobombeo y un 40 por ciento para los sistemas de hidrógeno.

MATTHIAS POPP

El diámetro de un sistema de muralla circular depende de las diferencias de altura del agua. En esta gráfica se suponen 200 metros de desnivel entre los niveles promedio, así como variaciones de unos 20 metros en la cuenca inferior y 50 en la superior.



rior. En los momentos de déficit energético, el agua a alta presión fluiría de arriba abajo a través de las tuberías y, a su camino, accionaría las turbinas y generaría electricidad.

COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS

Los cálculos muestran que los trabajos de movimiento de tierras necesarios para levantar un depósito de muralla circular supondrían, por kilovatio hora almacenado, costes equiparables a los de las centrales hidroeléctricas reversibles en zonas montañosas de media altura. Además, si en una región existen diferencias de altura naturales, el método de almacenamiento con muralla circular permite construir sistemas menores pero de igual rentabilidad. El diseño es libre, por lo que no hace falta que la cuenca inferior encierre a la muralla circular. Además, permite evitar zonas habitadas y otras localizaciones problemáticas.

En lo tocante a las dimensiones de la instalación, cabe mencionar que, si se duplican el diámetro, la altura y la variación de los niveles de agua previstos de las cuencas superior e inferior, la capacidad de almacenamiento energético se multiplica por 16. Consideremos, por ejemplo, una construcción con una muralla circular de 6,6 kilómetros de diámetro, una altura de 215 metros y una superficie de 700 metros de ancho al pie de la muralla (*véase la figura que abre este artículo*). El anillo exterior de la cuenca inferior podría tener unos 11 kilómetros de diámetro. En las inmediaciones podrían instalarse unos 2000 aerogeneradores de gran tamaño y, sobre el sistema de almacenaje, paneles fotovoltaicos, por lo que no sería necesario ocupar terreno adicional. Un sistema de tales características aseguraría un promedio de dos gigavatios de potencia y un máximo de 3,2 gigavatios, lo suficiente para garantizar el suministro a unos 2,6 millones de habitantes. El conjunto podría reemplazar así a dos centrales nucleares.

Una instalación como la propuesta, que cumpliría funciones de generación y almacenamiento energéticos, recibe el nombre de central híbrida. Según los cálculos, bastarían unas 30 instalaciones similares para cubrir la demanda energética de un país como Alemania únicamente a partir del viento y del sol. Podría prescindirse de los combustibles fósiles y de las centrales nucleares. Y, por supuesto, no habría costes por la adquisición de materia prima.

La altura prevista de las presas de las murallas circulares como la descrita puede parecer ambiciosa. Sin embargo, queda por debajo de la de la presa de Nurek, en Tayikistán, cuya construcción finalizó en 1980 y que, con sus 300 metros de altura, constituye hoy por hoy la presa más alta del mundo. En vista del riesgo de terremotos en la zona, la obra no se realizó con hormigón, sino con tierra. Al igual que numerosos embalses, el complejo de Nurek almacena varias veces más agua que el depósito que hemos considerado aquí.

Los sistemas de hidrobombeo tradicionales suelen completar su ciclo con un ritmo diario o incluso en menos tiempo, por lo que operan como almacenes a corto plazo. Por el contrario, los niveles de agua en un almacén de muralla circular concebido para operar a largo plazo mostrarían solo oscilaciones escasas durante el régimen normal de uso. El depósito se encontraría repleto durante la mayor parte del tiempo y el nivel del agua fluctuaría poco, sobre todo en verano. Una vez cada pocos años, en inviernos desacostumbradamente mansos, habría que contar con descargas cuantiosas. Por ello, la variación temporal del nivel del agua en la cuenca inferior sería equiparable a la de un río que sufre avenidas ocasionales. Durante los períodos normales de operación, las variaciones en el nivel del agua no excederían algunos centímetros, fluctuaciones que resultarían inapreciables en la cuenca inferior si esta se destina a actividades de ocio.

Los sistemas de suministro energético a partir de fuentes renovables dotados de depósitos como el propuesto aquí podrían conectarse por toda Europa. Ello incrementaría la seguridad del abastecimiento y ayudaría a compensar la variabilidad natural del viento y del sol, con lo que se reducirían las necesidades de almacenaje. Los depósitos podrían levantarse incluso en la costa, lo que eliminaría la necesidad de una cuenca inferior, ya que el mar ejercería como colector.

Según nuestros cálculos, para dotar a Alemania de un suministro completo basado de manera exclusiva en el almacenamiento de energía, la generación solar y la eólica, se necesitaría un aerogenerador por cada 1300 habitantes, así como 20 metros cuadrados de paneles solares y, según las dimensiones del sistema de almacenamiento, una superficie de agua de unos 40 metros cuadrados por habitante. En total, menos de un uno por ciento de la superficie del país. Esa área resulta inferior a la que hoy se destina al cultivo de biomasa para la generación de electricidad en instalaciones de biogás. En definitiva, creemos que esta opción de futuro no supone tanto un reto técnico o financiero, sino una cuestión de discusión pública y aceptación ciudadana.

© Spektrum der Wissenschaft

MATTHIAS POPP

PARA SABER MÁS

Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. M. Popp. Springer, Heidelberg, 2010.

Atrapar el viento. Davide Castelvecchi en *Investigación y Ciencia*, n.º 427, págs. 66-71, abril de 2012.





FOTÓNICA

TRUCOS CROMÁTICOS DE LA NATURALEZA

Siete tácticas empleadas por los animales para crear colores deslumbrantes inspiran la invención de técnicas complejas

Philip Ball

Philip Ball es doctor en física por la Universidad de Bristol. Fue editor de *Nature* durante más de 20 años. Ha escrito numerosos libros y artículos de divulgación científica.



Los cambiantes colores de la espléndida cola del pavo real siempre han cautivado a las mentes curiosas. El científico inglés del siglo xvii Robert Hooke los calificó de fantásticos en todos los sentidos, porque desaparecen si las plumas se humedecen. Hooke estudió esas estructuras con el entonces novedoso microscopio y comprobó que se hallaban cubiertas de diminutas estrías, a las que atribuyó los brillantes tonos amarillos, verdes y azules.

No andaba desencaminado. Los vivos colores del plumaje de las aves, las alas de las mariposas y el cuerpo de los calamares no suelen estar causados por pigmentos captadores de luz, sino por minúsculas estructuras reflectantes de apenas unos centenares de nanómetros de ancho. El tamaño y la separación entre ellas permiten captar ciertas longitudes de onda del espectro de la radiación solar. Los colores son irisados y mutables, casi mágicos, y oscilan del azul al verde o del naranja al amarillo, según el ángulo desde el que contemplemos al animal. Como los colores se originan por la fracción de luz reflejada y no por la absorbida, como sucede con los pigmentos, resultan más brillantes. La mariposa morfo azul de América Central y del Sur puede divisarse desde un kilómetro de distancia; parece relucir cuando los rayos de sol que penetran en el dosel de la selva inciden en sus alas.

Se está empezando a entender mejor el modo en que las primorosas nanoestructuras de los seres vivos modifican la luz, lo que está orientando la búsqueda de nuevos materiales ópticos inspirados en diseños biológicos. Tales materiales permitirían fabricar indicadores visuales más brillantes y nuevos sensores químicos, así como perfeccionar el almacenamiento, la transmisión y el procesamiento de la información.

Sabemos poco sobre la evolución de esas estructuras biológicas, pero al menos estamos descubriendo cómo se forman y cómo producen los extraordinarios colores. La naturaleza no dispone de técnicas complejas, como haces de electrones que graben finas capas de material, por lo que ha debido de recurrir al ingenio. Si los ingenieros pudieran dominar esas mismas técnicas, podrían desarrollar tejidos baratos que cambiarían de aspecto, como el camuflaje de los calamares, o chips que transmitirían datos por medios ópticos, en lugar de eléctricos, a una gran velocidad. En este artículo veremos algunos de los trucos utilizados por la naturaleza para crear estructuras cromáticas y el modo en que la ciencia intenta sacar provecho de ellos.

EN SÍNTESIS

Aves, mariposas, calamares y otros animales suelen lucir colores intensos o cambiantes que no están causados por pigmentos, sino por nanoestructuras muy organizadas cuyos entresijos se están comenzando a desentrañar.

Las figuras geométricas ordenadas o desordenadas de esas nanoestructuras reflejan solo ciertas longitudes de onda de luz y crean colores nítidos que pueden mutar si las estructuras se humedecen o varían de tamaño.

Se están diseñando materiales sintéticos que imitan esas configuraciones biológicas. Tales materiales podrían hacer cambiar el color de coches o vestidos en movimiento y formar parte de sensores que detectarían impurezas en el agua potable, eficientes chips ópticos para teléfonos móviles y marcas de autentificación para tarjetas de crédito.

GETTY IMAGES (*páginas anteriores*)



Las brillantes plumas verdiazules del ave del paraíso de Lawes adquieren de repente una tonalidad amarilla gracias a pequeños movimientos que desplazan las bárbulas situadas en las puntas de la pluma (*arriba*).

JOHN MASON, ARDEA (*pájaro*); CORTESÍA DE DOEKELE G. STAVENGA, UNIVERSIDAD DE GRONINGA (*plumas*)

1 CAPAS SOBRE CAPAS

Las estrías que Hooke descubrió en las plumas del pavo real dispersan la luz, pero sus colores brillantes emanan en general de nanoestructuras que él no pudo ver, situadas bajo la superficie. Las coloridas plumas de las aves y las escamas de los peces y mariposas contienen capas o bastoncillos ordenados de tamaño microscópico, confeccionados con un material denso que dispersa la luz. La distancia entre las capas o bastoncillos se asemeja a las longitudes de onda de la luz visible, por lo que esas estructuras difractan la luz. Los rayos incidentes de ciertas longitudes de onda se reflejan en las capas y se interfieren entre sí de forma constructiva o destructiva, realzando algunos colores y anulando otros en la luz reflejada. Ese mismo proceso crea el arco iris que vemos sobre la pulida superficie de un disco compacto cuando lo movemos.

Las capas reflectantes de las alas de las mariposas están formadas por un polímero natural, la quitina, y se hallan separadas por huecos de aire dentro de la dura superficie externa (cutícula) de las escamas alares. En las plumas, en cambio, las capas o bastoncillos están compuestos de melanina y se hallan encastados en queratina, la proteína del pelo y las uñas. La industria óptica ya incorpora rejillas de difracción fabricadas con capas alternas y ultrafinas de dos materiales que filtran y reflejan la luz de un solo color. La técnica se aplica en productos que van desde los telescopios hasta los láseres de estado sólido.

El macho del ave del paraíso de Lawes (*Parotia lawesii*) aprovecha esa táctica de una manera ingeniosa, según descubrió en 2010 Doekele G. Stavenga, de la Universidad de Groninga. Las bárbulas piliformes de las plumas de su pecho albergan capas de melanina separadas por una distancia tal que relucen con brillantes reflejos anaranjados y amarillos. Además, cada bárbula posee una sección transversal en forma de V cuyas superficies inclinadas reflejan la luz azul. Durante el cortejo nupcial, los pequeños movimientos de estas plumas permiten al galán mudar de color y alternar con rapidez entre tonos amarillos, anaranjados y verdiazules, una exhibición que siempre consigue captar la atención de la hembra.

La tecnología todavía no ha intentado imitar el efecto descrito, pero Stavenga imagina que el mundo de la moda y la industria del automóvil acabarán simulando estos cambios cromáticos. Las microescamas en V incorporadas en la tela de un vestido harían variar su color con los movimientos del portador; añadidas a la pintura de carrocería, conferirían iridiscencia a los automóviles en marcha.

2 COMO UN ÁRBOL DE NAVIDAD

El deslumbrante azul de las mariposas *Morpho didius* y *M. rhetenor* no se debe a la superposición de múltiples capas de quitina, sino de nanoestructuras más complejas situadas en las escamas de las alas. Se trata de formaciones de quitina que se disponen como las ramas de un abeto y sobresalen en la superficie externa de la escamas. Las ramas paralelas de cada «árbol» actúan como otro tipo de rejilla de difracción. Tales composiciones reflejan hasta el 80 por ciento de la luz azul incidente. Como no son planas, reflejan un único color desde múltiples ángulos de visión, aunque con ello se reduce la iridiscencia. Sin embargo, los animales no siempre desean que su color cambie cuando son observados desde lugares distintos.

Como Hooke advirtió en las plumas del pavo real, cuando el agua empapa las alas de estas mariposas, la refracción de la luz varía. Los líquidos con índices de refracción dispares provocan reflejos cromáticos distintos. Los investigadores de GE Global Research en Niskayuna, Nueva York, junto con colaboradores de la Universidad de Albany y el experto en lepidópteros Pete Vukusic, de la Universidad de Exeter, están desarrollando estructuras artificiales similares a las de las mariposas *Morpho*. Están creando sensores químicos que permiten identificar distintos líquidos, al adoptar un determinado color en función del líquido con el que entran en contacto. Utilizan técnicas microlitográficas prestadas de la industria de los semiconductores para grabar tales estructuras en cuerpos sólidos. Los sensores podrían detectar emisiones en centrales eléctricas o impurezas en el agua potable.

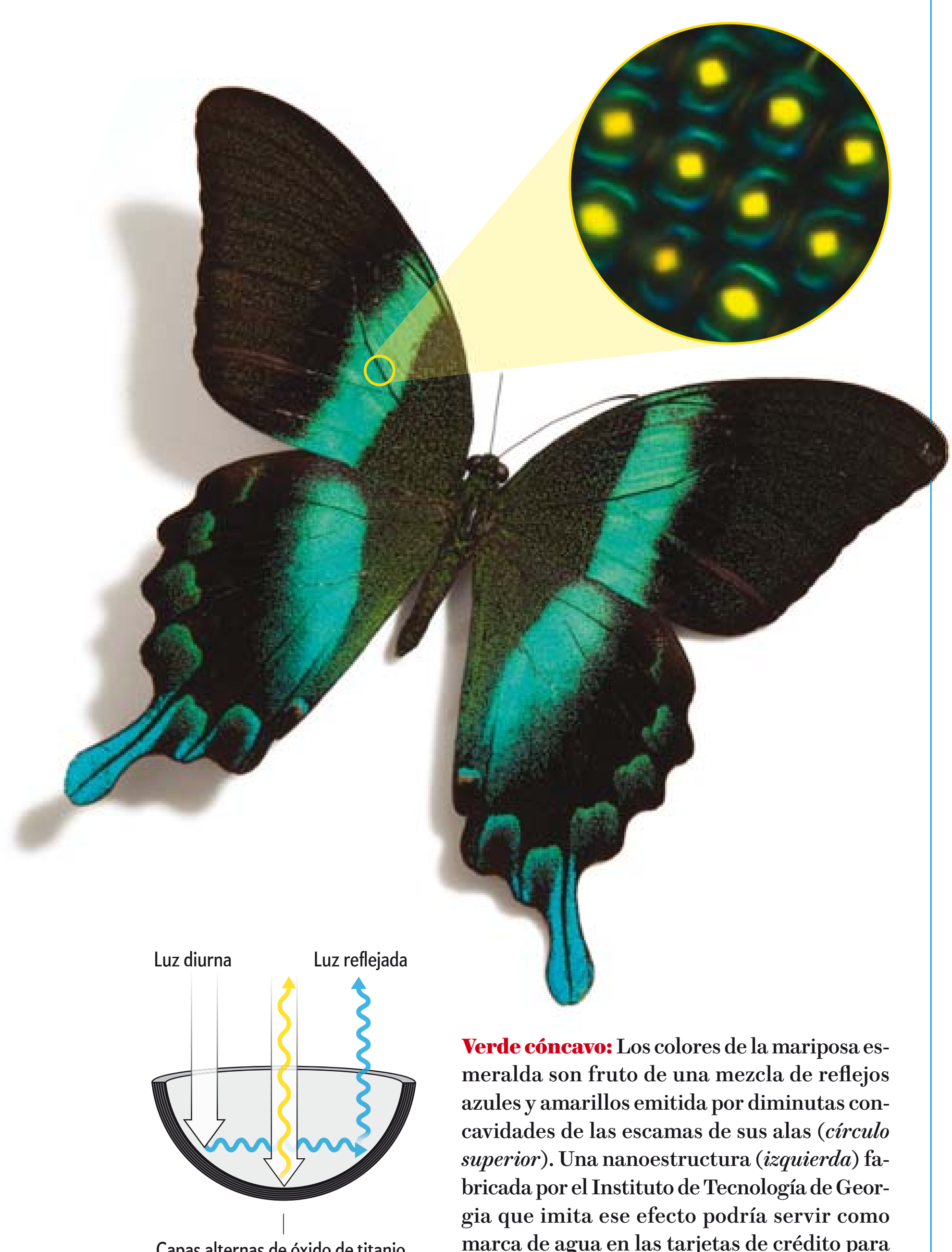
3 CONCAVIDADES REFLECTORAS

El verde reluciente de la mariposa esmeralda (*Papilio palinurus*), abundante en el sudeste asiático, no está producido por la luz de ese color. Las escamas de sus alas están cubiertas de una malla de minúsculos hoyuelos semiesféricos de escasos micrómetros de diámetro. Estos están forrados de capas de quitina separadas por aire que actúan como espejos selectivos. El centro del fondo refleja la luz amarilla y los costados, la azul. A esa escala tan pequeña, el ojo humano no puede distinguir entre el amarillo y el azul, pero el cerebro ve la combinación de ambos como verde.

Christopher Summers y Mohan Srinivasarao, del Instituto de Tecno-

logía de Georgia, han copiado ese método para elaborar colores. Para crear las diminutas concavidades dejan condensar vapor de agua en forma de gotitas microscópicas sobre la superficie de un polímero que pasa del estado líquido al sólido. Las gotículas se agrupan sobre la superficie como las filas de una huevera y se hunden en la película. A medida que el polímero se solidifica, las gotas se evaporan y se crea una superficie cubierta de hoyuelos. Sobre ellos, los investigadores depositan finas capas alternas de óxido de titanio y óxido de aluminio para fabricar un reflector que imita el recubrimiento natural de la mariposa.

La luz que rebota en la película en relieve es verde. Pero si esta se coloca bajo un montaje de filtros polarizadores, la luz amarilla que rebota del centro de las concavidades desaparece mientras la luz azul de los bordes sigue brillando. Este mecanismo podría servir como una marca de autentificación para las tarjetas de crédito. Lo que a primera vista pudiera parecer un sencillo recubrimiento reflector de color verde ocultaría, en realidad, una señal polarizada amarilla y azul que dificultaría su falsificación.



Verde cóncavo: Los colores de la mariposa esmeralda son fruto de una mezcla de reflejos azules y amarillos emitida por diminutas concavidades de las escamas de sus alas (*círculo superior*). Una nanoestructura (*izquierda*) fabricada por el Instituto de Tecnología de Georgia que imita ese efecto podría servir como marca de agua en las tarjetas de crédito para impedir su falsificación.

4 NANOESPONJAS

La mariposa *Parides sesostris* crea el color verde mediante una nanoestructura distinta de la anterior, sin contar tampoco con pigmento alguno. En las escamas de sus alas lucen estructuras cristalinas con orificios microscópicos. Estos cristales fotónicos reflejan la luz dentro de una banda de longitudes de onda. El ópalo, una gema semipreciosa, debe su iridiscencia a cristales fotónicos constituidos por microesferas de sílice apiladas, las cuales dispersan la luz y le confieren los colores del arco iris. Los cristales fotónicos se pueden utilizar para confinar la luz en canales estrechos y crear guías que podrían orientar la luz a través de espacios angostos en el interior de los chips informáticos.

Observadas bajo el microscopio electrónico, las escamas de la mariposa *P. sesostris* muestran figuras en zigzag, parches esponjosos de quitina con conjuntos ordenados de orificios de unos 150 nanómetros de diámetro. Cada parche es un cristal fotónico orientado en un ángulo ligeramente distinto al del cristal vecino. La estructura resultante refleja la luz de la banda verde del espectro desde múltiples ángulos. Algunos gorgojos y otros escarabajos también deben sus colores tornasolados a estos cristales fotónicos de quitina.

El biólogo Richard Prum, de la Universidad de Yale, y sus colaboradores han deducido cómo crecen estos cristales fotónicos en el ala de la joven mariposa. En esencia, los lípidos contenidos en las células embrionarias de las escamas alares forman espontáneamente un molde tridimensional geométrico en torno al cual se endurece la quitina. Cuando las células mueren, los lípidos se degradan y dejan una matriz hueca con cavidades regulares.

Los investigadores intentan construir estructuras similares partiendo de cero. Por ejemplo, los surfactantes, unas moléculas similares a los lípidos, forman esponjas ordenadas de igual modo que los llamados copolímeros de bloque. Ulrich Wiesner, de la Universidad Cornell, ha utilizado esos copolímeros para fabricar «nanoesponjas» minerales a base de nanopartículas de óxido de niobio y titanio.

Esos sólidos porosos podrían ofrecer una amplia gama de aplicaciones, como la creación de células fotovoltaicas más eficaces y baratas. Asimismo, Wiesner ha calculado que las nanoesponjas fabricadas con metales como la plata o el aluminio podrían poseer una extraña propiedad: un índice de refracción negativo. Ello significa que refractarían la luz del «modo equivocado». Y si tales materiales se hicieran realidad, podrían fabricarse microscopios ópticos con superlentes que harían visibles objetos más pequeños que la propia longitud de onda de la luz, algo imposible con los microscopios clásicos.

MONICA STEVENSON, GETTY IMAGES (*mariposa*); CORTESÍA DE MOHAN SRINIVASARAO, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE GEORGIA (*inserto*)

5 FIBRAS DE CRISTAL

Los animales modelan los cristales fotónicos de múltiples maneras. Las cerdas de algunos gusanos marinos, como el ratón de mar (*Aphrodita*), contienen haces hexagonales de fibras huecas de unos cientos de nanómetros de diámetro. Estos haces, formados por quitina, reflejan la luz de la banda roja del espectro y confieren a las cerdas un color rojo iridiscente.

No está claro si esas propiedades ópticas desempeñan una función biológica en el ratón de mar, pero sin duda las fibras que modifican la luz pueden tener aplicaciones tecnológicas en el campo de la óptica. Philip Russell, ahora en el Instituto Max Planck de Ciencias Fotónicas de Erlangen, ha calentado e introducido haces de capilares de vidrio en delgadas fibras entrelazadas dotadas de orificios que forman grupos hexagonales. La inserción de un capilar más ancho o de una barra maciza en medio del haz original crea un defecto en el grupo de orificios a través del cual la luz circula sin que lo haga por el cristal fotónico circundante. Así se crea una fibra óptica que presenta un revestimiento casi impenetrable para una franja de longitudes de onda concreta.

Las fibras de cristal fotónico pierden menos luz que las fibras clásicas y podrían acabar reemplazándolas en las redes de telecomunicaciones, puesto que precisan menos energía y permitirían prescindir de los costosos amplificadores que refuerzan las señales transmitidas a larga distancia. Las fibras habituales pierden mucha luz cuando se doblan excesivamente, porque en ángulos cerrados las reflexiones que confinan la luz en el seno de la fibra resultan menos eficientes. Por esa razón, las nuevas fibras funcionarían mejor en espacios pequeños y cerrados. Con ellas se podrían fabricar microchips ópticos más rápidos que los chips electrónicos de los ordenadores y teléfonos móviles actuales.

6 MATRICES DEFORMADAS

Para crear colores, algunos animales construyen matrices esponjosas donde impera el desorden. Esta variante estructural es la responsable del espléndido plumaje verde y azul de numerosas aves que carecen de iridiscencia. En ellas la nanoestructura espongiforme de queratina está desordenada y la luz se dispersa de forma difusa, como sucede con el azul del cielo. Los colores siempre muestran el mismo tono uniforme, vistos desde cualquier ángulo.

En el guacamayo azulamarillo (*Ara ararauna*) y el alción capirotado (*Halcyon pileata*), los espacios vacíos que surcan la matriz de las barbas de las plumas conforman canales sinuosos de unos 100 nanómetros de anchura. Una red aleatoria similar confiere a la cutícula del escarabajo *Cyphochilus* un deslumbrante color blanco. En el saltarín coroniazul (*Lepidothrix coronata*), en cambio, los orificios de aire no corresponden a canales, sino a pequeñas burbujas conectadas entre sí.

Prum cree que los canales y las burbujas aparecen cuando la queratina se separa espontáneamente del líquido de las células de la pluma durante las primeras etapas del desarrollo, como lo hacen el aceite y el agua. Además, las aves han desarrollado un método para controlar la velocidad de separación de la queratina, de modo que la formación del canal o la burbuja se detiene cuando los huecos alcanzan un tamaño determinado. De este tamaño depende la longitud de onda de la luz dispersada y, por ende, el color de la pluma.

La dispersión difusa de la luz también puede observarse en otras sustancias, como en la opaca blancura de la leche, donde las gotículas de grasa de diversos tamaños dispersan todas las longitudes de onda de la luz visible.

Vukusic ha conseguido imitar la cutícula del escarabajo *Cyphochilus* con matrices porosas aleatorias de carbonato de calcio o dióxido de titanio, que mezcla con un polímero para fabricar recubrimientos de un blanco reluciente. Por su parte, Prum y el bioingeniero Eric Dufresne, también de Yale, han imitado las esponjas desordenadas de las plumas creando películas de microperlas poliméricas agrupadas al azar que brillan con tonos verdiazules. Con esos métodos se podrían confeccionar recubrimientos de colores opacos intensos, incluso de muy escaso espesor, que no perderían nunca la vivacidad al no contener pigmentos orgánicos.

7 PROTEÍNAS REVERSIBLES

Uno de los trucos ópticos de la naturaleza más envidiables son los cambios reversibles de color. La piel de los calamares de la familia *Loliginidae* alberga una proteína, la reflectina, con la que alteran su apariencia. Las moléculas de esta proteína se hallan apiladas en placas dentro de células especializadas, los iridóforos, que reflejan colores específicos. Se cree que los cambios de coloración sirven como camuflaje y como medio de comunicación para el apareamiento y los combates.

Daniel Morse, de la Universidad de California en Santa Bárbara, estudia la función de los iridóforos. La reflectina se aglutina en nanopartículas que forman placas, y estas a su vez se insertan entre los pliegues de la membrana celular del iridóforo. Cuando un neurotransmisor activa un proceso bioquímico que anula la carga eléctrica de las moléculas de reflectina, estas se comprimen aún más. El cambio aumenta la reflectividad de las placas y modifica la separación entre ellas, lo que altera el color. El efecto se invierte cuando la reflectina recupera su carga.

Morse intenta remedar este mecanismo en instrumentos ópticos, tal vez mediante el uso de la reflectina. Su equipo ha introducido en bacterias *Escherichia coli* el gen de la reflectina del calamar de Boston (*Loligo pealeii*). Cuando el gen se expresa, la proteína se agrupa y forma nanopartículas. El tamaño de estas se puede ajustar con sales que modulan las interacciones entre las cargas de las proteínas. De este modo, los materiales se dilatan o se contraen, lo que altera las longitudes de onda reflejadas en respuesta a los impulsos químicos.

Morse ha desarrollado también un polímero que pasa de la transparencia a la opacidad, y viceversa, al aplicarle un voltaje eléctrico. El cambio de voltaje altera la reflectividad del polímero y dilata la película polimérica por la entrada de sal. Dispositivos con este tipo de materiales pueden fabricarse con métodos sencillos que no precisan técnicas avanzadas. Su equipo está colaborando con Raytheon Vision Systems en Goleta, California, con el fin de incorporar este material en obturadores rápidos para cámaras infrarrojas, las cuales podrían filmar a alta velocidad en la oscuridad al captar calor en lugar de luz.

PARA SABER MÁS

Photonic structures in biology. Pete Vukusic y J. Roy Sambles en *Nature*, vol. 424, págs. 852-855, 14 de agosto de 2003.
Natural photonics. Pete Vukusic en *Physics World*, vol. 17, n.º 2, págs. 35-39, febrero de 2004.
Optical filters in nature. H. D. Wolpert en *Optics and Photonics News*, vol. 20, n.º 2, págs. 22-27, febrero de 2009.
A protean palette: Colour materials and mixing in birds and butterflies. Matthew D. Shawkey y cols. en *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 6, suplemento n.º 2, págs. S221-S231, 6 de abril de 2009.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Aires de flauta

La inestabilidad de una corriente de aire puede resultar muy útil: de ella depende la producción del sonido en órganos y flautas

Para emitir una nota, un trompetista hace vibrar sus labios; un clarinetista, una lengüeta de caña, y un violinista, una cuerda. Pero ¿qué ocurre con flautistas y organistas? Nada se mueve aquí: ni en el interior del instrumento ni en la boca del músico. Sin embargo, ello no impide que de ellos emane una melodía. ¿Se debe ese prodigio al tubo que poseen órganos y flautas? En el siglo XIX, el físico alemán Carl Friedrich Sondhausson demostró que no: el sonido nace de la vibración de un chorro de aire que interacciona con un obstáculo con forma de bisel.

El bisel no hiende el aire

¿Qué ocurre con el aire en una flauta dulce? Al principio, el músico sopla por una hendidura que se introduce en el instrumento en forma de canal. De este brota un chorro de aire de un centímetro y medio de largo y muy fino (del orden de un milímetro), similar al que se obtiene al apretar el extremo de una manga de riego. Tras unos milímetros de propagación libre, el chorro topa con un bisel.

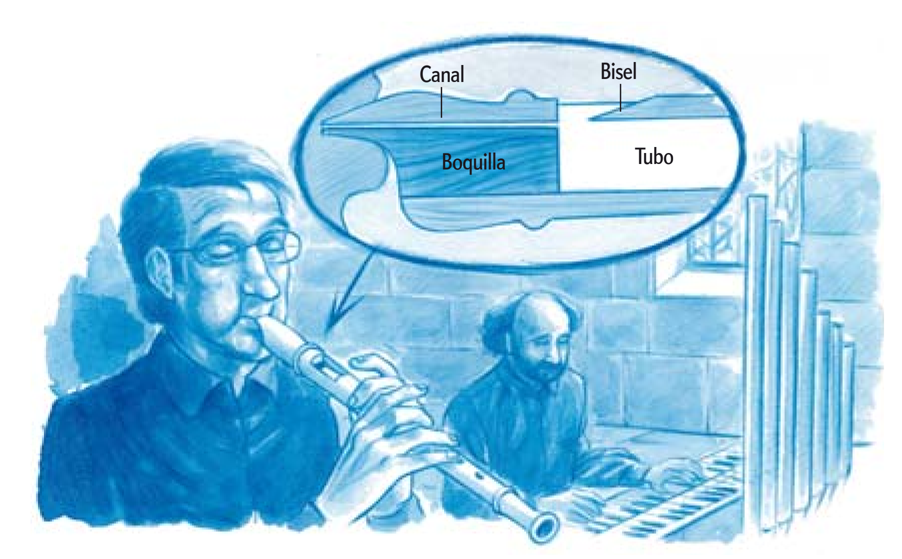
Podría pensarse que el bisel hiende en dos el chorro de aire. Sin embargo, imágenes tomadas a partir de una mezcla de humo y aire muestran que eso no ocurre. El chorro mantiene su integridad y, cual lengüeta vibrante, ejecuta oscilaciones verticales que le hacen pasar de un lado a otro de la arista del bisel. Ese proceso va acompañado de la formación de remolinos, por lo que parte de la energía del chorro se encuentra en forma de ondas acústicas. Estas se perciben como un sonido cuya altura se corresponde con la frecuencia de las oscilaciones del chorro a un lado y otro del bisel.

Un fenómeno similar se da en situaciones más familiares, como el silbido del viento en las líneas de alta tensión, o el sonido que se produce al soplar sobre el canto de una hoja de papel. Uno de los precursores en el estudio del «sonido de bisel» fue el abate Carrière de Toulouse, cuyos trabajos contribuyeron a demostrar que el chasquido de un látigo es, en realidad, un estallido supersónico. Sus experimentos de 1925 pusieron de manifiesto que el sonido solo aparece si la velocidad del chorro rebasa cierto umbral. Cuando su velocidad aumenta, la frecuencia de las oscilaciones debería crecer poco a poco. Sin embargo, el sonido que percibimos experimenta una brusca subida de tono. ¿Por qué?

En 1894, Lord Rayleigh demostró que un chorro de aire es, en esencia, un fenómeno inestable: la menor perturbación se amplifica de manera exponencial en la dirección de la propagación hasta convertirlo en turbulento y arremolinado. Eso sucede incluso cuando la corriente inicial exhibe un flujo regular. Para apreciarlo, basta con colocarse ante el conducto de descarga de una piscina y observar lo que ocurre con el chorro de agua. En una flauta, el ruido asociado al aire insuflado señala la formación de turbulencias. Cuando una corriente libre no produce más que un ruido difuso, compuesto por una multitud de frecuencias sonoras, el bisel las selecciona y transforma ese ruido en un sonido de frecuencia bien definida.

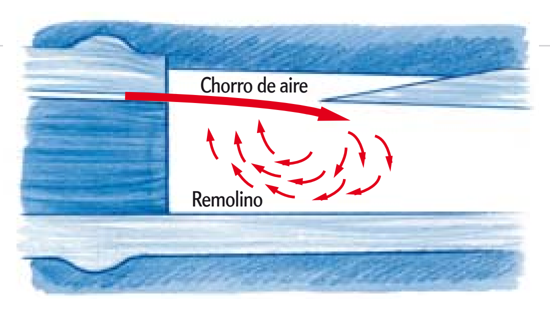
Imaginemos un chorro de aire que comienza deslizándose por debajo del bisel. A su paso, captura aire antes inmóvil y, como ocurre con un chorro libre sometido a una perturbación, se crea un remolino que envía aire hacia atrás, hacia el orificio del que manó el chorro. Al llegar, esa perturbación eleva el chorro y lo empuja hacia el lado opuesto del bisel, tras lo cual la situación se invierte y el proceso se repite. En consecuencia, el chorro comienza a oscilar a un lado y otro del bisel de manera periódica.

¿Cuál es el período máximo de esa oscilación? Este se hallará determinado por el tiempo que necesita el remolino para ir del bisel, donde fue creado, al orificio:



Una flauta o el tubo de un órgano carecen de piezas móviles. El sonido se produce por la acción de una arista maciza, aquí un bisel, sobre el chorro de aire insuflado. Esa interacción provoca la oscilación del chorro de aire a un lado y otro del bisel. Las frecuencias de esa oscilación quedan determinadas en gran medida por las propiedades del tubo.

BRUNO VACARO (*ilustraciones*)



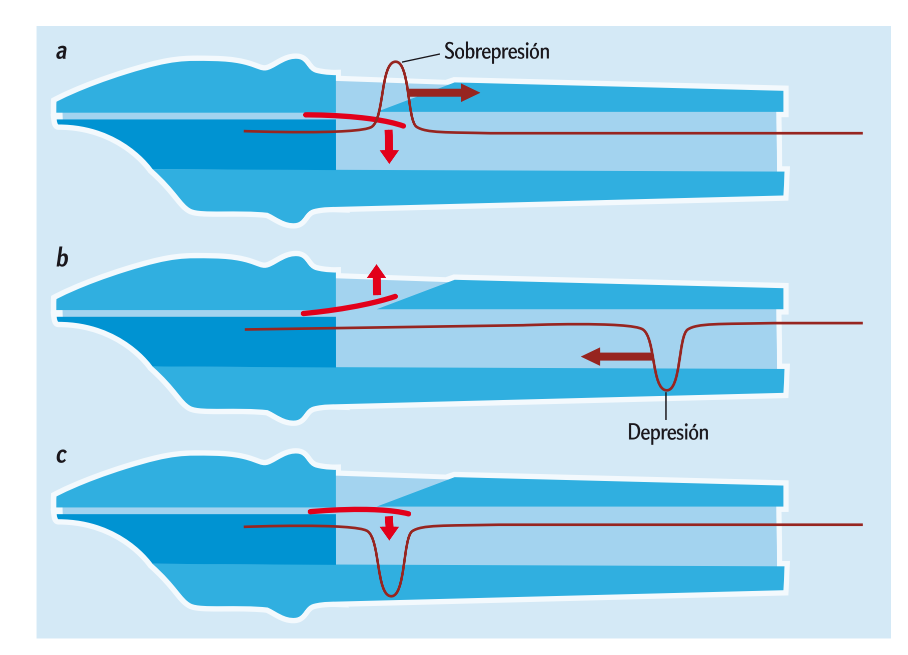
A la salida del canal, el chorro de aire no es hendido por el bisel, sino desviado hacia un lado u otro de la arista. Además, se produce una perturbación en la corriente. Si la velocidad del chorro rebasa un cierto umbral, aparece un remolino que arrastra parte del aire que sigue. Ello empuja el chorro de aire en la dirección vertical y lo fuerza a cambiar de lado con respecto al bisel.

en efecto, el chorro de aire, que se halla al comienzo de su fase descendente en el momento en que se forma el remolino, comenzará a ascender cuando el remolino lo alcance y lo empuje hacia arriba. Este proceso se corresponde con un semiperíodo de oscilación, un tiempo aproximadamente igual a la distancia que media entre el orificio y el bisel dividida por la velocidad inicial del chorro de aire. Con una separación de cinco milímetros y una velocidad del chorro igual a diez metros por segundo, obtendríamos una frecuencia de unos 1000 hercios, perfectamente audible.

El chorro juega al yoyó

El razonamiento anterior nos ha permitido calcular el período máximo, correspondiente a la frecuencia mínima. Ahora bien, el retorno del remolino seguirá estando en fase con la oscilación vertical del chorro de aire también si este vibra tres, cinco o cualquier número impar de veces más rápido (es decir, siempre que el chorro ejecute, además de la semioscilación, un número entero de ciclos durante el trayecto del remolino). Por tanto, para una determinada velocidad del chorro de aire, las frecuencias posibles ascienden a múltiplos impares de la frecuencia fundamental.

De entre todas las frecuencias posibles, la preferida por el sistema queda determinada por el grado de inestabilidad del chorro. Cada pasada de la lámina de aire a la altura del bisel crea un remolino. Por tanto, el número de estos aumentará a medida que lo haga la frecuencia. Cuando el flautista insufla aire a mayor velocidad, crece la inestabilidad de la corriente y, con ella, la frecuencia de la oscilación. Ello induce un salto brusco de una frecuencia a la siguiente, lo que provoca las discontinuidades en el tono.



El tubo de la flauta hace de caja de resonancia y determina la frecuencia de las oscilaciones verticales del chorro de aire. El descenso del chorro crea una sobrepresión que se propaga hacia la derecha (*a*). Al llegar al extremo de la flauta, donde la presión es igual a la atmosférica, esa sobrepresión se refleja convertida en una depresión (*b*). Su llegada a la altura del pico debe coincidir con el momento en que el chorro de aire inicia un nuevo movimiento descendente, de forma que aspire aire hacia abajo (*c*).

Pero ¿oímos el sonido de bisel cuando un flautista ejecuta una melodía? Para el aire que se encuentra en el interior del tubo, el chorro desempeña el mismo papel que la lengüeta en un clarinete. En una flauta, sin embargo, es el tubo resonador el que modifica las frecuencias de oscilación de la lámina de aire. Ello se debe a que induce un mecanismo de retroacción más potente que el retorno de los remolinos al que hacíamos referencia más arriba. No en vano, la propagación del sonido en el tubo supone un fenómeno puramente acústico, el cual engendra unos campos de presión bastante más intensos que los movimientos hidrodinámicos del remolino.

El tubo impone su ley

El tono del sonido queda fijado por la duración de un trayecto de ida y vuelta de la onda acústica a lo largo del tubo. Imaginemos una lámina de aire que fluye bajo el bisel y consideremos su presión. A la altura del bisel, la lámina genera una sobrepresión que se propagará por el tubo. Si el extremo de este se encuentra abierto, como ocurre en una flauta, la presión allí será constante e igual a la atmosférica. Por tanto, dicho extremo actuará como un espejo: la sobrepresión se reflejará parcialmente en forma de una depresión que se propagará en sentido contrario y retornará hacia el pico. Esa depresión amplificará el movimiento de la lámina de aire si su llegada a la altura del bisel coincide con un período de oscilación: en tal caso, la lámina de aire se verá aspirada hacia abajo en el mismo momento en que se dispone a fluir bajo el bisel.

En esa geometría simple, la frecuencia obtenida asciende al doble de la longitud del tubo dividida por la velocidad del sonido. Dicha frecuencia puede resultar muy diferente de la frecuencia propia del bisel. En la práctica, la obtención de un sonido interesante y rico en armónicos necesita no pocos ajustes: de la posición del bisel con respecto al canal, la longitud de las aberturas, etcétera. Además, el flautista o el clarinetista también pueden participar en los gallos: estos se producen en los momentos en que la lámina de aire (o la lengüeta) escapa a los dictados de la acústica del tubo y vibra con su frecuencia fundamental.

PARA SABER MÁS

Musical acoustics (2.ª edición). D. E. Hall. Brooks/Cole Publishing, 1991.

The physics of musical instruments (2.ª edición). H. Fletcher y Th. D. Rossing. Springer, 1998.

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de California del Sur.



Crónica de un éxodo anunciado

Cómo razonar a partir del conocimiento de los demás

Cien monjes conviven en un paraje remoto. Cada uno de ellos tiene los ojos o bien azules, o bien marrones. Hay más de un monje con los ojos de cada color, y cada uno de ellos sabe que sus propios ojos son azules o marrones. Sin embargo, su religión les impide averiguar de qué color son sus ojos e incluso discutir el asunto con los demás cofrades. Por supuesto, cada monje puede ver los ojos de sus compañeros, pero desconoce de qué color son los suyos, ya que evitan cualquier superficie que refleje su imagen. De acuerdo con los preceptos de la orden, si alguno de los miembros llegara a descubrir de qué color son sus ojos, debería abandonar la comunidad al mediodía del día siguiente.

Todos los monjes son sumamente devotos y, además, todos ellos razonan de manera impecable: si una conclusión se sigue lógicamente de una serie de premisas, entonces cada uno de ellos extraerá siempre dicha conclusión. Por último, cada monje no solo conoce estos dos hechos, sino que sabe que cada monje los conoce, sabe que cada monje sabe que cada monje los conoce, y así sucesivamente.

Un día, la comunidad recibe un visitante de ojos azules que, tras meses de contacto, se gana el respeto y la confianza de los cofrades. Hacia el final de su estancia, el huésped se dirige a los mojes para agradecerles su hospitalidad. Sus palabras son bien recibidas hasta que, en cierto momento, el visitante comete el error de mencionar su color de ojos, cuando afirma:

¡Quién iba a decirme que encontraría a alguien con mi mismo color de ojos en un paraje tan remoto!

La indiscreción provoca un gran silencio entre la multitud.

¿Consecuencias previsibles?

¿Qué ocurrirá tras el comentario del visitante? Resulta muy tentador responder que no sucederá nada serio. Al fin y al cabo, parece difícil que ningún monje pueda deducir el color de sus ojos a partir de la observación del viajero. Tal vez el desliz del huésped ofenda a los cofrades, pero no les dice nada que no supieran ya. Dado que hay más de un monje con los ojos azules, todos los habitantes de la comunidad pueden ver, al menos, a un monje con el mismo color de ojos que el huésped. Por tanto, cada uno de los monjes sabía ya que al menos uno de los miembros de la comunidad tenía ojos azules.

No olvidemos, sin embargo, que los monjes extraerán cualquier consecuencia lógica que se siga de una serie de premisas, por muy compleja que sea la cadena de razonamientos que lleve a ella. Por sorprendente que parezca, la indiscreción del visitante acabará provocando el éxodo de todos los habitantes de la comunidad en menos de cien días. Ello se debe a que la situación desencadenada por el huésped permitirá que cada uno de los monjes halle un argumento que les lleve a concluir la siguiente proposición:

Si hay exactamente n monjes de ojos azules, donde $1 \leq n \leq 100$, entonces todos ellos abandonarán la comunidad al mediodía del enésimo día tras el anuncio del visitante.

El razonamiento procede por inducción sobre el número n de monjes con los ojos azules:

- Si $n = 1$, el único monje de ojos azules deducirá de qué color son sus ojos a partir del comentario del huésped, ya que podrá ver que ningún otro monje tiene el mismo color de ojos que el visitante. Por tanto, el desdichado cofrade deberá abandonar la comunidad al mediodía del día siguiente.

Ello demuestra que la proposición anterior es cierta para el caso $n = 1$. Una vez que cada monje haya establecido el caso base, procederá a dar el paso inductivo:

- Supongamos que existen n monjes con los ojos azules y que la proposición es cierta para todo número menor que n. Cada uno de ellos vería entonces $n - 1$ monjes de ojos azules y, al cabo de $n - 1$ días, podría emplear el siguiente razonamiento:

Si no tengo los ojos azules, entonces puedo deducir que hay a lo sumo $n - 1$ monjes de ojos azules. Pero, de acuerdo con la hipótesis inductiva, todos ellos deberían haber abandonado la comunidad al mediodía del día $n - 1$ tras el anuncio del visitante. Si ninguno de ellos lo ha hecho aún, se sigue que también mis ojos son azules.

Dado que el razonamiento es el mismo para todos los monjes de ojos azules, todos ellos abandonarán la comunidad al mediodía del enésimo día tras el anuncio del visitante.

DANIEL UZQUIANO



Una vez que los monjes de ojos azules abandonen la comunidad, los monjes de ojos marrones podrán deducir su color de ojos del hecho de que n monjes de ojos azules hayan abandonado la comunidad al mediodía del día anterior. Cada monje razona que, si sus ojos fueran azules, entonces el número total de religiosos con ojos azules habría sido $n + 1$. En consecuencia, los monjes de ojos azules no habrían abandonado la comunidad hasta el mediodía del día $n + 1$. Como no es eso lo que ha ocurrido, cada uno de los religiosos que aún permanecen allí puede deducir que su color de ojos no es azul. Como todos ellos saben que hay tan solo dos colores de ojos en la comunidad, el suyo no puede ser sino marrón. Una vez concluido este hecho, no tienen más remedio que abandonar la comunidad al mediodía del día $n + 1$ tras el anuncio del visitante.

Recordemos que estipulamos que había más de un habitante de ojos azules y más de uno con los ojos marrones, por lo que en la comunidad existen, a lo sumo, 98 miembros de ojos azules. En tal caso, todos ellos habrán abandonado la cofradía al mediodía del día 98 tras el anuncio del visitante. Después, los dos monjes que quedaban deberán partir el día 99.

Conocimiento común

¿Cómo explicar el éxodo, teniendo en cuenta que el visitante no ha dicho nada que los monjes no supieran ya? La clave reside en que la indiscreción del huésped convierte en *conocimiento común* la proposición de que hay al menos un monje de ojos azules. Dado un grupo de personas y una proposición p, decimos que esta constituye conocimiento común si cada uno de los miembros del grupo sabe que p, cada uno de ellos sabe que cada uno sabe que p, cada uno sabe que cada uno sabe que cada uno sabe que p, y así sucesivamente.

Es cierto que cada monje sabía que había al menos un miembro de la comunidad con los ojos azules. Pero no todos tenían por qué saber que el resto de los habitantes lo sabía. Si, por ejemplo, hubiese solo dos cofrades de ojos azules, a_1 y a_2, cada uno de ellos sabría que existe un habitante de ojos azules, pero ninguno de ellos tendría por qué saber que el otro también lo sabe: a_1 ve a un monje de ojos azules, pero, dado que desconoce de qué color son sus ojos, no sabe que a_2 también ve un monje de ojos azules. A menos que hable el visitante, a_1 no sabe que a_2 sabe que hay un monje de ojos azules.

¿Qué ocurriría su hubiera *tres* monjes de ojos azules, a_1, a_2 y a_3? Cada uno de ellos sabría que hay al menos un habitante de ojos azules, ya que puede ver a sus compañeros. Además, a_1 sabe que a_2 ve un monje de ojos azules, de lo que deduce que a_2 sabe que hay al menos un monje de ojos azules. Sin embargo, preguntémonos lo siguiente:

¿Sabe a_1 que a_2 sabe que a_3 sabe que hay al menos un monje de ojos azules?

Recordemos que a_1 desconoce de qué color son sus ojos. Pero, si a_2 sabe que a_3 sabe que hay al menos un monje de ojos azules, ha de ser porque a_2 sabe que a_3 ve un monje de ojos azules. Dado que a_2 ignora que tiene ojos azules, si sabe que a_3 ve un monje de ojos azules debe ser porque sabe que a_3 ve un monje de ojos azules que no es ni a_2 ni a_3. Por tanto, a_2 sabe que a_3 sabe que hay al menos un monje de ojos azules solo si a_2 sabe que a_1 tiene ojos azules. Como a_1 solo ve dos monjes de ojos azules, a_1 solo puede saber que a_2 sabe que a_3 sabe que hay al menos un



monje de ojos azules si conoce de qué color son sus propios ojos.

Sin embargo, antes del anuncio, a_1 no cuenta con ningún medio para deducir de qué color son sus ojos. Por lo tanto, no puede saber que a_2 sabe que a_3 sabe que hay al menos un monje de ojos azules. Pero, tras el anuncio del visitante, cada monje sabe que hay al menos un monje de ojos azules. No solo eso: cada monje sabe que cada monje lo sabe, cada monje sabe que cada monje sabe que cada monje lo sabe, y así sucesivamente. A medida que transcurran los días los monjes podrán extraer información adicional a partir de quién abandone o no la comunidad.

El día del anuncio

Después del comentario del visitante, la proposición de que hay al menos un monje de ojos azules se ha convertido en conocimiento común. Si hubiera solo un monje con ojos azules, este sería ahora capaz de deducir de qué color son sus ojos del hecho de que el visitante ve un monje de ojos azules, mientras que él no ve ninguno. En tal caso, el monje habría de abandonar la comunidad al mediodía del día siguiente.

Al mediodía del primer día

Si nadie se ha exiliado al mediodía del primer día, entonces los monjes deducirán que hay al menos dos habitantes de ojos azules. Como constituye conocimiento común que los monjes razonan de manera impecable, la proposición de que hay al menos dos habitantes de ojos azules también se convertirá en conocimiento común. Si hubiera exactamente dos monjes de ojos azules, cada uno de ellos deduciría el color de sus propios ojos a partir del hecho de que únicamente ve a un monje de ojos azules, pero este aún no ha abandonado la comunidad. Por tanto, los dos monjes de ojos azules abandonarán la comunidad al mediodía del día siguiente.

Al mediodía del segundo día

Si nadie se ha exiliado al mediodía del segundo día, entonces los monjes deducirían que hay al menos tres habitantes de ojos azules. Dado que es conocimiento común que los monjes razonan como lo hacen, la conclusión anterior se convierte también en conocimiento común. Si hubiera exactamente tres habitantes de ojos azules, cada uno de ellos deduciría su propio color de ojos a partir del hecho de que solo ve dos monjes de ojos azules a su alrededor, pero estos no han abandonado aún la comunidad. Como los tres deducirán su propio color de ojos al mismo tiempo, todos ellos se exiliarían al mediodía del día siguiente.

Resulta posible proseguir la cadena de razonamientos y comprobar que, para cualquier número n de monjes con ojos azules, todos ellos se habrán exiliado el enésimo día. Como todos saben que sus ojos son o bien azules, o bien marrones, si un monje puede deducir que no tiene ojos azules, entonces debe concluir que tiene ojos marrones. El resto de los habitantes también tendrá que partir al mediodía del día siguiente, lo cual supondrá el fin de la congregación.

¿Cómo evitar el éxodo?

¿Qué ocurre si el visitante se percata de las consecuencias de su comentario y decide tomar alguna medida para impedir la desaparición de la comunidad?

El visitante podría nombrar a un monje en concreto, a_1, como alguien con ojos azules. Si lo hace el mismo día del anuncio, entonces a_1 se verá obligado a exiliarse al mediodía del primer día. Sin embargo, aunque el hecho de que hay al menos un habitante de ojos azules sea conocimiento común el mismo día del anuncio, ello ya no implica que, al mediodía del primer día, todos los monjes puedan deducir que hay al menos dos habitantes de ojos azules. Supongamos que, aparte de a_1, hay tan solo otro monje de ojos azules, a_2. Todos los monjes de ojos marrones saben que había al menos dos habitantes de ojos azules. Sin embargo, tras la partida de a_1, a_2 tan solo ve habitantes de ojos marrones a su alrededor y no posee ningún medio para deducir que hubiese dos habitantes de ojos azules en la congregación. Su ignorancia hace que, al mediodía del primer día, no sea conocimiento común que dos de los miembros de la comunidad tenían los ojos azules, con lo cual no podemos echar mano del argumento anterior.

Por otra parte, si el visitante espera demasiado a nombrar un monje de ojos azules, entonces la táctica podría no surtir efecto. Supongamos que hay cuatro monjes de ojos azules: a_1, a_2, a_3 y a_4, y que el visitante no nombra a a_1 como uno de ellos hasta pasado el mediodía del primer día. En tal caso, tras el mediodía del primer día, será conocimiento común que hay al menos dos monjes de ojos azules, ya que nadie ha abandonado la comunidad. El efecto de nombrar a a_1 como uno de ellos hará que este abandone la comunidad al mediodía del segundo día. Tras su partida, sigue siendo conocimiento común que hay al menos dos monjes de ojos azules. Si nadie más abandona la comunidad al mediodía del tercer día, entonces la proposición de que hay al menos tres habitantes de ojos azules se convertirá en conocimiento común. Todos ellos, a_2, a_3 y a_4, podrán deducir el color de sus ojos a partir del hecho de que solo ven dos habitantes de ojos azules y ninguno de ellos ha abandonado todavía la congregación. Por tanto, todos abandonarán la comunidad al mediodía del cuarto día.

En general, si el visitante quiere evitar la catástrofe k días después del anuncio (suponiendo que había más de k habitantes de ojos azules en la comunidad) entonces debe nombrar a k habitantes de ojos azules ese mismo día. Si, antes del mediodía del segundo día, el huésped nombra a a_1 y a_2 como habitantes de ojos azules, ambos abandonarán la comunidad al mediodía del segundo día. Por tanto, el resto ya no podrá deducir que es conocimiento común que haya al menos tres habitantes de ojos azules al mediodía del tercer día tras el anuncio.

PARA SABER MÁS

Existen numerosas versiones del mismo problema, cuya finalidad principal consiste en ilustrar la noción de conocimiento común y sus aplicaciones: **plato.stanford.edu/entries/common-knowledge**

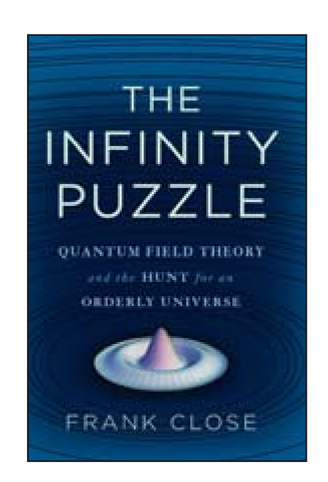
El matemático Terence Tao ha propuesto una versión del problema en su blog: **terrytao.wordpress.com/2011/04/07/the-blue-eyed-islanders-puzzle-repost**

ACLARACIÓN

En el artículo «La insoportable necesidad del ser», del pasado mes de mayo, se introducía el «principio de generalización universal» (GU). Nos gustaría aclarar que GU es una regla de inferencia cuya formulación completa es:

Si $...y... \rightarrow ...x...$ es un teorema, entonces $...y... \rightarrow \forall x \; ...x...$ es un teorema.

Aunque existen otras formulaciones de la regla, esta nos permite inferir (IB): Nec $(\forall x \; ...x...) \rightarrow \forall x$ (Nec $...x...$) directamente a partir de (4) Nec $(\forall x \; ...x...) \rightarrow$ Nec $...x...$.



THE INFINITY PUZZLE,

por Frank Close; Oxford University Press, Oxford, 2011.

La física como juego

¿Cómo se redimen los físicos de la ambición por ganar un Nobel?

La física como juego. Un puñado de científicos cosmopolitas, entre los que no se cuenta ninguna mujer, ponen todo su empeño en descubrir el origen del universo, la naturaleza de las fuerzas, el por qué de la masa de las partículas elementales. No cabe duda de la magnitud de la empresa: estos hombres tratan con la génesis y la revelación (título de las dos partes de este libro), y nos dejan a un paso de desvelar «la mismísima cuestión de la existencia». Su búsqueda de conocimiento, sin embargo, se ve empañada por las polémicas decisiones de otro puñado de hombres, los miembros del Comité Nobel de Física, que hacen y deshacen carreras científicas. Los investigadores ceden a la ambición por ganar el premio, pero esto, lejos de disminuir su estatura científica o moral, los hace más humanos y, finalmente, les redime a ellos y a su física.

Esa es la trama del último libro de Frank Close, profesor de física teórica de la Universidad de Oxford, quien suma un nuevo título a una considerable lista de obras de divulgación, algunas de las cuales se hallan disponibles en castellano gracias a Crítica (*La cebolla cósmica*, 1988, y *Fin: la catástrofe cósmica y el destino del universo*, 1991). Como ya hiciera en *Too hot to handle. The race for cold fusion* (Princeton University Press, 1991) a propósito del furor en torno al descubrimiento de la fusión fría, Close se mide con la historia. Su narración de «nuestro viaje al espacio interior» no pretende idealizar aún más el premio Nobel, sino reflejar la ciencia «tal como sucede en el mundo real» y mostrar que los físicos «experimentan las mismas emociones, presiones y tentaciones» que el resto de mortales. En el propósito de restituir materialidad, emoción y humanidad a la física contemporánea coincidirían no pocos de sus analistas; no así en la forma en que Close realiza este propósito.

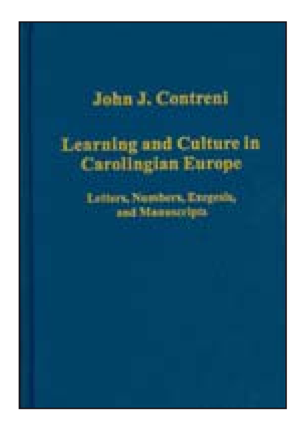
Close juega dos buenas bazas. En primer lugar, el libro brilla en la divulgación de la física de las partículas elementales y sus interacciones. Sin recurrir a las matemáticas, mediante metáforas y diagramas, Close explica de forma amena y asequible en qué consiste el modelo estándar, la ruptura espontánea de simetría o el bosón de Higgs, aunque a veces se le vaya la mano y deslice frases propias de un artículo especializado, como cuando se pregunta «si la simetría se rompe espontáneamente en presencia de un bosón vectorial gauge sin masa, como el fotón».

La otra baza de Close son los testimonios que ha recabado de sus colegas y los retratos personales de físicos como Gerard 't Hooft, Sheldon Glashow o Steven Weinberg, entre muchos otros con quienes se ha escrito o ha hablado. Close ha consultado también documentos de archivo muy relevantes, como las notas manuscritas de R. Feynman sobre la visita al Centro del Acelerador Lineal de Stanford (actualmente Laboratorio del Acelerador Nacional SLAC) en agosto de 1968, que propiciaría la formulación de su modelo de partones; o los manuscritos de artículos fundamentales de Weinberg («A model of leptons», 1967) y Abdus Salam y John C. Ward («Electromagnetic and weak interactions», 1964). Algunos de estos documentos están reproducidos en las figuras.

Consciente de la falibilidad de la memoria personal y colectiva, Close se ha dejado aconsejar por «respetables historiadores de la ciencia» (léase el físico-historiador Abraham Pais) a la hora de explotar sus testimonios. Pero Pais es, junto a Andrew Pickering (autor de *Constructing quarks*, University of Chicago Press, 1984), el único historiador de la física citado en la bibliografía, y el interés por las impresiones de los protagonistas no tiene continuidad en la reflexión sobre los múltiples problemas metodológicos que plantea su uso. ¿Constituye la memoria personal, que es necesariamente parcial, una garantía de veracidad? ¿Cómo afecta el paso del tiempo a la evocación de lo vivido? Close parece creer implícitamente en la aproximación asintótica a una verdad histórica provisional, en la posibilidad de un juicio a posteriori que mejore el de la Academia de Ciencias Sueca o incluso, en el caso del bosón de Higgs, se anticipe a ella. Por ello invita a los lectores a contribuir toda información que pueda mejorar la versión actual y reitera en el epílogo su disposición a actualizarla. No necesita aclarar que se dirige tan solo a aquellos lectores que, como él, tienen una experiencia directa de los acontecimientos descritos.

Los límites de la sensibilidad histórica de Close, sin embargo, son aún más precisos. El subtítulo del libro hace referencia a «la alta política y el experimento más caro del mundo», pero se trata de una referencia casual y probablemente comercial, porque no hay ningún intento por analizar la compleja relación entre física y política contemporáneas. Lo más inquietante y desconcertante del libro de Close, dada su condición de académico, es la casi absoluta falta de referencias al trabajo de autores que han tratado las mismas cuestiones. Por poner solo los ejemplos más llamativos, es difícil explicar la ausencia en estas páginas de la biografía de los creadores de la electrodinámica cuántica por el físico e historiador Sylvan S. Schweber (*QED and the men who made it*, Princeton, 1994); la biografía de Julian Schwinger por Jagdish Mehra y Kimball A. Milton (*Climbing the mountain: A scientific biography of Julian Schwinger*, Oxford, 2000); el magnífico análisis por David Kaiser de la creación y difusión de los diagramas de Feynman (*Drawing theories apart. The dispersion of Feynman diagrams in postwar physics,* Chicago, 2005); y sobre todo, dada la omnipresencia de la Academia de Ciencias sueca en el relato de Close, el libro de Robert M. Friedman sobre la política de los Nobel (*The politics of excellence. Behind the Nobel prize in science*, Nueva York). No solo la física, también su historia es un juego para Close.

—Xavier Roqué
Universidad Autónoma de Barcelona



LEARNING AND CULTURE IN CAROLINGIAN EUROPE. LETTERS, NUMBERS, EXEGESIS, AND MANUSCRIPTS,

por John J. Contreni. Ashgate/Variorum; Farnham, 2011

Renacimiento carolingio

Transformación de la sociedad a través de la escolarización

Impresionado por los logros obtenidos en los siglos octavo y noveno de nuestra era en tierras francas, Jean-Jacques Ampère acuñó en 1839 la expresión «renacimiento carolingio». Con el avance de la historiografía se distingue incluso un doble renacimiento, el del reinado de Carlomagno (ca. 742-814), que da nombre a la dinastía, y el de su nieto Carlos el Calvo (823-877) en el tercer cuarto del siglo IX. En uno y otro caso, un resurgimiento intelectual imbricado en una profunda reforma de la sociedad.

El nexo inseparable de vida monacal y vida intelectual define el período carolingio, un tiempo en que nos hallábamos rodeados, anota Alcuino, «de libros escritos por hombres sabios, frecuentando el pensamiento de los Padres, sin que faltara nada de lo necesario para la vida religiosa y la búsqueda del conocimiento». Alcuino, un anglosajón educado en York, nacido hacia 730 y fallecido en 804, simboliza esa época de transformación. Dos documentos con sello del emperador y redacción de Alcuino, uno fechado en marzo de 789 y el otro en algún momento del decenio de 790, impulsan la reforma: la *Admonitio Generalis* y la *Epistola de litteris colendis*. Esta segunda iba dirigida a los monasterios del reino. Venía a poner remedio a su clamorosa falta de formación. Sin un bagaje cultural, sin dominio del latín, los monjes, pensaba Carlomagno, ni podían entender mejor las Escrituras ni transmitir su mensaje a los demás. La *Admonitio Generalis* tenía un propósito más universal. Los 82 artículos de la *Admonitio* se proponían «corregir lo que es erróneo, cortar lo que es inadmisible y potenciar lo que es justo». Cincuenta y nueve de los 82 artículos derivan de los *Dionisio-Hadriana*, una colección de cánones que Carlomagno había solicitado del papa Adriano I (r. 772-795). Entre los cánones sobre disciplina de los clérigos, se les apremiaba a establecer escuelas.

La preocupación por la educación venía de lejos. Desde el poder feudal se dieron pasos en la promoción del estudio, pero los documentos carolingios no tuvieron par en su ambición y en el respaldo real y episcopal. Monasterios y catedrales pusieron su ahínco en la copia de textos, construcción de bibliotecas, creación de manuales y apertura de aulas para niños y adolescentes. A través de dos textos escolares podemos contemplar el alcance de ese esfuerzo. El primero es el tratado de Hrabano Mauro *De institutione clericorum libri tres*. Hrabano (ca. 780/784-856) lo escribió en el monasterio de Fulda. Sus alumnos le pidieron que juntara en un volumen las notas sueltas que había ido dictando. La sección final del tratado se consagraba a lo que debían saber quienes accedieran a las órdenes sagradas: el currículo de las artes liberales. Una educación, pues, cristiana y de orden práctico. La guía de Notker de San Gall sobre los principales comentarios de la Escritura constituye otro texto que puede considerarse producto e índice de la práctica educativa carolingia. Notker (ca. 840-912) preparó un programa de docencia apoyado en la obra de Agustín, Jerónimo, Gregorio Magno, Isidoro de Sevilla, Alcuino y Hrabano Mauro.

La palabra *schola* tenía una larga tradición. Podía referirse a un grupo (artesanos, cantores o soldados). Desde finales del siglo VIII, vino a significar el conjunto de alumnos en torno a un maestro que seguían un plan de formación académica y espiritual. En cuanto lugar de enseñanza, solía ser un edificio anexo al monasterio, la catedral o incluso el palacio, aunque hubo eremitas que enseñaban en sus refugios apartados. Aparecen directivas episcopales (de Herardus de Tours y Teodulfo de Orleáns, por ejemplo) para que los sacerdotes creen escuelas parroquiales. Cuando Fulco (r. 883-900) fue elegido arzobispo de Reims, se encontró con unas escuelas rurales e incluso catedralicias en proceso de descomposición. Las restableció trayéndose a dos de los maestros más famosos de su tiempo, Remigio de Auxerre (ca. 841-ca. 908) y Hucbald de Saint-Amand (ca. 850-930), e incluso enseñando él mismo.

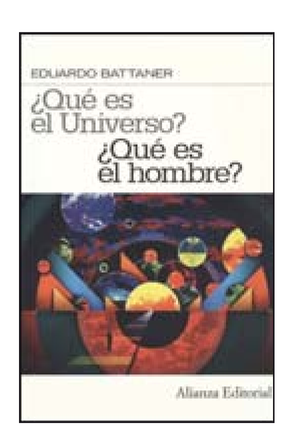
Aquí y allá encontramos referencias a mujeres ilustradas: Gisla (ca. 757-810) y Rotrud (ca. 775-810), hermana e hija de Carlomagno, respectivamente, que solicitan a Alcuino un comentario al evangelio de san Juan para ellas. Pero no solo la alta sociedad. Se hallaba extendida la formación de las monjas, dedicadas ellas mismas a la enseñanza de los niños de los alrededores del cenobio. Con las monjas de Soisson aprendió Paschasius Radbertus. En *De ecclesiis et capellis,* Hincmar de Reims se muestra partidario de la separación de los niños y las niñas en las escuelas. En las escuelas, los niños aprendían a leer, escribir, calcular y cantar; se preparaban así para comenzar el estudio de las artes liberales. Las artes menores se agregaron al currículo: astrología, medicina, artes del arado y del maestro de obras. Las introducciones generales, como *El matrimonio de Filología y Mercurio*, de Martianus Capella, y las *Etimologías* de Isidoro de Sevilla servían de auxiliar. Pero necesitaban a su vez sus propios comentarios. Se valoraba la depuración del estilo en la redacción. Sacerdotes y monjes debían aprender a calcular cuándo caía la Pascua y los equinoccios.

La formación comenzaba con el estudio de la gramática latina. Se servían de manuales tales como *Ars mayor* y *Ars minor* de Donato, que introducían a los alumnos en las partes del lenguaje. Junto a las estructuras, los alumnos aprendían un extenso glosario de vocablos latinos, con entradas sacadas de diversos autores (Jerónimo, Ambrosio, Agustín, Isidoro de Sevilla, Virgilio, Orosio) y textos médicos y científicos. Ello no suponía el abandono de la lengua vernácula. Lupus de Ferrières envió tres monjes jóvenes al monasterio de Prüm precisamente para aprender alemán, porque era una lengua útil. Los concilios de Tours en 813 y de Mainz en 847, así como los estatutos de Vesoul, recomendaban explícitamente que los sacerdotes predicaran en el idioma de sus fieles. Los glosarios grecolatinos que han llegado hasta nosotros nos indican que los alumnos podían progresar y, dominado el latín, introducirse en el griego.

Los carolingios prestaron atención a las artes del quadrivio (aritmética, geometría, astronomía y música). Construir

edificios, definir límites, calcular proporciones, cartografiar la armonía de los cuerpos celestes y crear traducciones adecuadas de un calendario a otro (del romano al hebreo, por ejemplo) puso a prueba el ingenio de maestros y alumnos. No era tarea fácil poner en correlación las fases de la Luna con formaciones planetarias, ni enseñar los sistemas calendáricos en ciclos anuales de 8, 84, 85, 112 y 532 años. Recordar cómo hallar las nonas, idus y calendas de cada mes requería un dominio cabal del calendario romano. Los estudios de ciencias desempeñaron un papel importante. Partían de los tratados de Boecio sobre aritmética y geometría; el manual sobre artes liberales de Martianus Capella; las *Institutiones* de Casiodoro; las obras de Isidoro de Sevilla, Plinio, Vitrubio y Victorio de Aquitania. Las obras de Beda, en particular su *De temporum ratione*, pertenecían a una categoría especial. La colección más importante de problemas aritméticos consta de una serie de 56 *propositiones* reunidas en el siglo noveno y atribuidas a Alcuino. El afán pedagógico llevó a los maestros a presentar los principios científicos de forma visual, mediante grafos y mapas. No se ceñían a las configuraciones planetarias. Un diagrama de un manuscrito de Fleury compendia en una sola imagen las relaciones entre los cuatro elementos, las cuatro estaciones, los cuatro humores y las cuatro edades del hombre.

—Luis Alonso



¿QUÉ ES EL UNIVERSO? ¿QUÉ ES EL HOMBRE?,
por Eduardo Battaner. Alianza Editorial; Madrid, 2011

Reflexiones de un OMBE frente al cosmos

El desarrollo de la cosmología como ciencia y su perspectiva acerca de la vida

Parece poco probable que un objeto de muy baja entropía, un OMBE, pueda llegar a comprender algún día la totalidad del universo, incluido el papel que desempeña dentro de este.

Sin embargo, el profesor Battaner nos demuestra en este libro que es posible llegar bastante lejos, armados únicamente con nuestro intelecto, una insaciable curiosidad y una buena dosis de sentido del humor. Utilizando un lenguaje natural, asequible para cualquier lector con una mente inquisitiva, se nos invita a razonar sobre el universo, sin recurrir a tecnicismos más allá de lo estrictamente necesario ni perder por ello un ápice de rigor; se nos invita a deducir, a partir de un cielo estrellado, que el universo no se halla en equilibrio, que no puede ser eterno e infinito, o que su color es de aproximadamente un milímetro.

Palabra tras palabra, las piezas que conforman la imagen contemporánea del cosmos se van desgranando una a una, desde el origen y el significado mismo del espacio y el tiempo hasta el papel que históricamente han desempeñado Dios, dios y algunos de los hombres y mujeres que, con sus acciones e ideas (también mayúsculas y minúsculas), han ido contribuyendo al avance de la cosmología como ciencia. La cronología de nuestro universo se recorre de fin a principio, tal y como la observan los astrónomos, y de principio a fin, deteniéndonos en algunas de las etapas más destacadas, como su más tierna infancia (antes incluso de que se formasen las primeras partículas), la recombinación del hidrógeno (la época más lejana que podemos observar directamente), la formación de las primeras estrellas y galaxias, o los posibles destinos finales del universo y todo lo que contiene.

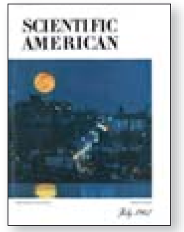
Por el camino, nos iremos encontrando con algunos de los pilares fundamentales que sustentan el pensamiento científico actual: la teoría de la relatividad, que nos permite comprender y navegar por la estructura del espaciotiempo; la fusión nuclear, que alimenta el corazón de las estrellas y que, a lo largo de trece mil millones de años, ha ido dando lugar a todos y cada uno de los átomos que forman esta página; la termodinámica, que nos explica por qué la ropa no se guarda sola en los cajones; o las teorías de Darwin y Lamarck acerca del corto camino (tan solo en el sentido temporal) que los primates hemos recorrido desde la aparición de la primera molécula autorreplicante. Nos aproximaremos, además, a algunos de los problemas abiertos más acuciantes de la cosmología: la naturaleza de las leyes físicas, la creación del universo, la posibilidad de que exista un multiverso, el desarrollo de la vida, o las consecuencias (nada triviales) del principio antrópico, que establece que únicamente podemos vivir en un lugar en el que podamos vivir.

Y es precisamente a la vida, tal y como la entiende un cosmólogo, a la que se le dedica la última parte del libro. Se plantea en primer lugar una definición en términos físicos de lo que representa estar vivo, ya se trate de un hombre o de una medusa del puerto de Salobreña. Lo que ambos tienen en común es su alto grado de organización; es decir, su baja entropía por unidad de masa, que únicamente puede mantenerse mediante una continua y cruenta lucha, perdida de antemano, contra el segundo principio de la termodinámica. Es por ello por lo que el autor, en busca de una hipotética denominación objetiva que un astrónomo podría dar a los seres vivos en general, y a los humanos en particular, inventa el término OMBE (Objeto de Muy Baja Entropía), cuyo significado profundo —que no su posible adopción por la Real Academia de la Lengua— explora y justifica de forma elocuente.

Bajo esta perspectiva termodinámica, la evolución de los seres vivos y el proceso de selección natural adquieren un nuevo cariz, aún más misterioso y sobrecogedor, si cabe, que los que se derivan de su concepción desde el punto de vista estrictamente biológico. Destaca, sobre todo, la improbabilidad estadística de la vida; la asombrosa tozudez en existir, contra todo pronóstico, que la hace tan maravillosa.

—Yago Ascasibar
Universidad Autónoma de Madrid

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



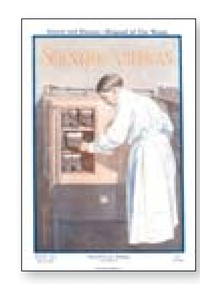
Julio 1962

Ante una guerra nuclear

«En el número del 31 de mayo de *The New England Journal of Medecine* se examinan con detalle las consecuencias de los 20 megatones previstos para Boston en un escenario de ataque nuclear: "Puede que los vectores de las epidemias sobrevivan a la radiación mejor que la población humana. En esas circunstancias, la encefalitis equina del este, la hepatitis, la poliomielitis y otras enfermedades endémicas podrían alcanzar proporciones epidémicas." Una rápida eliminación de los cadáveres resultará esencial para controlar la epidemia y sus portadores, como moscas y roedores, además de por razones psicológicas, "no por menos evidentes, menos importantes". Los autores, que citan un estudio de la Agencia para la Movilización de la Defensa Pasiva, coinciden en la opinión de que "la ciudad en ruinas deberá vallarse o acordonarse y someterse a cuarentena."»

Peligro, escualos

«Datos de experimentos recientes podrían servir de recordatorio a bañistas, submarinistas, navegantes de pequeñas embarcaciones y otros que se aventuran en el océano de que hasta ahora no hay protección segura alguna contra los tiburones en mar abierto. Hace tiempo que se sospecha que los tiburones poseen una notable capacidad para localizar a sus presas, con frecuencia a distancias considerables. El estudio, en consecuencia, se ha centrado en los órganos sensoriales (*fotografía*) que gobiernan su comportamiento depredador. —Perry W. Gilbert.»



Julio 1912

Piscina de olas artificiales

«Probablemente ninguno de los artículos exhibidos en la Exposición Internacional de Higiene, celebrada el año pasado en Dresde, llamara más la atención del público que la piscina de olas artificiales Undosa. La recaudación por la venta de boletos de baño (unos seis centavos cada uno) fue inesperadamente alta: subió hasta los 450 dólares solo en un día. Es evidente que el baño de olas artificiales puede convertirse en una práctica muy rentable a la par que saludable. Todas las personas pueden beneficiarse del masaje que produce el movimiento del agua.»

Hazañas temerarias

«Entre los más conocidos animadores del mundo del espectáculo hay que mencionar al señor Harry Houdini, cuyas célebres hazañas con esposas, camisas de fuerza y otras ataduras empleadas para sujetar a locos y rebeldes son bien conocidas. El domingo 7 de julio, el señor Houdini invitó a un grupo de periodistas e interesados en la magia a presenciar un sorprendente truco en la bahía de Nueva York. Una caja, en cuyo interior el señor Houdini había sido "embalado para exportación", fue lanzada al agua. Un minuto y diez segundos después, Houdini emergió del agua y nadó hacia la lancha de salvamento que se había preparado al efecto. El acto fue presenciado por miles de personas que se apiñaban en las cubiertas de tres transbordadores.»

Colisiones en el mar

«El naufragio del Titanic fue una dura y dolorosa conmoción para todos nosotros; en esa terrible catástrofe muchos perdimos a amigos y conocidos. Me hice una pregunta: "¿Ha agotado la ciencia todas las posibilidades? ¿No existe un modo de evitar una pérdida tan deplorable de vidas y propiedades? Miles de barcos quedan destruidos al chocar con la costa en medio de la niebla, centenares de ellos al colisionar con otros barcos o con icebergs, casi siempre con el resultado de grandes pérdidas humanas y materiales." Al cabo de cuatro horas se me ocurrió que los barcos deberían equiparse con lo que podríamos llamar un sexto sentido, capaz de detectar grandes objetos en su proximidad inmediata. —Sir Hiram Maxim».

La idea de Maxim precedió a la invención del sónar.



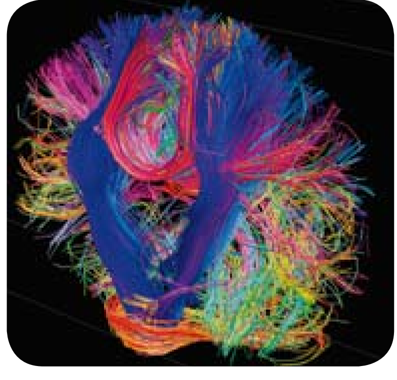
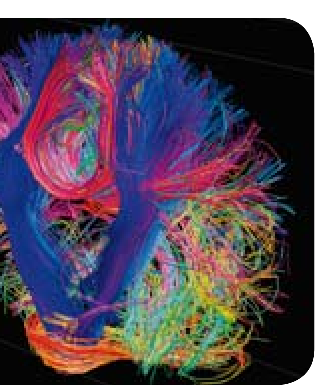
La vista de los tiburones: el doctor Perry Gilbert, de la Universidad Cornell, examina el ojo de un tiburón mako anestesiado (la anestesia empezará a disiparse al cabo de 20 minutos).

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 207, N.º 1; JULIO DE 1962

Julio 1862

Peligro de rabia

«El medio más efectivo de evitar la mordedura de los perros e impedir que transmitan la enfermedad parece ser el bozal. M. Renault, el distinguido veterinario, sostiene que la afirmación de que los bozales son de por sí una causa de la rabia, por la coacción que ejercen sobre el animal, carece de todo fundamento ante unos hechos perfectamente establecidos. Por otra parte, hace hincapié en los resultados obtenidos en Berlín. Cuando en 1854 el bozal se declaró rigurosamente obligatorio para todos los perros no atados, la facultad de veterinaria de Berlín comprobó solo nueve casos entre 1854 y 1861, y ninguno desde 1856.»

NEUROCIENCIA

El proyecto cerebro humano

Henry Markram

La creación de una gran simulación digital del cerebro podría transformar la neurociencia y la medicina, y abrir nuevas vías para la construcción de ordenadores más potentes.



ASTROFÍSICA

Súper supernovas

Avishay Gal-Yam

Las estrellas de mayor tamaño mueren en explosiones más potentes de lo que nadie creía posible, algunas provocadas en parte por la producción de antimateria.

BIOQUÍMICA

Efectos del sol en el ADN

Thierry Douki, Jean-Luc Ravanat, Dimitra Markovitsi y Évelyne Sage

Los rayos ultravioleta solares provocan cánceres de piel mediante la modificación del ADN de las células de este tejido. Estos son los mecanismos fotoquímicos implicados.



MEDICINA

La red social definitiva

Jennifer Ackerman

Las investigaciones sobre nuestro microbioma arrojan luz sobre los beneficios que las bacterias aportan a la salud.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Ian Brown
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss
ADVISER, PUBLISHING AND BUSINESS DEVELOPMENT Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

José M. Vidal Donet: *La medicina del futuro*; Luis Bou: *Borrar los recuerdos dolorosos*; Ángel Garcimartín: *Nóbeles y noveles*; Manuel Puigcerver: *Nóbeles y noveles*; Ramón Pascual: *Nóbeles y noveles*; Fernando J. Rodilla: *Nóbeles y noveles*; Alberto Ramos: *Árboles, bucles y nueva física*; Fabio Teixidó: *Huracán a la vista* Tanja Sachse: *Aprovechamiento energético del mar y Centrales reversibles de muro circular*; Andrés Martínez: *Trucos cromáticos de la naturaleza*; J. Vilardell: *Apuntes, Curiosidades de la física y Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes*

Copyright © 2012 Scientific American Inc., 75 Varick Street, New York, NY 10013-1917.

Copyright © 2012 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España